



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS

INGENIERÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE

TEMA:

DISEÑO DE UNA PROPUESTA PARA LA OPTIMIZACIÓN
DEL ÁREA DE CONVERSIÓN DE UNA FÁBRICA DE CAJAS
DE CARTÓN

AUTOR:

JEAN CARLOS LOAYZA ROMERO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO 2018

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer primero a Dios y a mis padres ya que han sido pilar fundamental de este logro, a los docentes de la institución que me compartieron los mejores conocimientos, a verdaderos amigos y personas que de manera desinteresada contribuyeron durante mi vida universitaria.

DEDICATORIA

El presente trabajo y el esfuerzo puesto en él se lo dedico con todo cariño a mi padres, hermanos y demás familiares que en varias circunstancias presentadas en mi vida estudiantil supieron darme el apoyo debido y el respaldo incondicional para superar cualquier eventualidad.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por: Jean Carlos Loayza Romero y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Jean Carlos Loayza Romero

RESUMEN

El presente trabajo trata de solucionar el problema existente dentro del proceso de conversión de la fabricación de cajas de cartón, el alto índice de esperas dentro de este proceso principalmente causado por la falta de una planificación propia genera altos costos de almacenamiento. De allí nace la necesidad de la creación de una planificación exclusivamente para este proceso tomando en cuenta las limitaciones existentes dentro de esta área. Se pretenderá solucionar este problema diseñando un algoritmo metaheurístico basado en el modelo matemático de secuenciamiento Flow Shop con la finalidad de realizar la planificación de cada una de las máquinas existentes dentro del área de conversión para así reducir el tiempo total de procesamiento y tiempo de espera de cada orden de trabajo entre otros beneficios. Para la creación de esta solución se tomó en cuenta la necesidad diaria de realizar esta actividad y el corto tiempo que se dispone para ella.

ABSTRACT

The present paper studies the problem within the conversion process of the manufacture of cardboard boxes, the high rate of waiting in this process mainly caused by the lack of proper planning of high storage costs. Hence, the need for the creation of a new selection for this process, taking into account the good connections within this area. We will try to solve this problem by designing a metaheuristic algorithm based on the mathematical Flow Shop sequencing model with the definition of the existing machine planning within the conversion area to reduce the total processing time and waiting time of each work order between other benefits. For the creation of this solution, you can take into account the daily need to carry out this activity and the short time available for it.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA.....	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ABREVIATURAS.....	XII
GLOSARIO	XIII
CAPÍTULO 1	13
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1 ANTECEDENTES	13
1.2 SITUACIÓN ACTUAL	14
1.2.1 SITUACIÓN ACTUAL EN EL ÁREA DE CORRUGADO	15
1.2.2 SITUACIÓN ACTUAL EN EL ÁREA DE CONVERSIÓN	17
1.2.3 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	19
1.3 DIAGRAMA DE LA PROBLEMÁTICA.....	21
1.4 HIPÓTESIS.....	21
1.5 OBJETIVOS	22
1.5.1 OBJETIVOS GENERALES.....	22
1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
1.6 MARCO TEÓRICO	22
1.6.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	22

1.6.2	MARCO CONCEPTUAL.....	23
1.6.3	MODELOS MATEMÁTICOS	28
CAPÍTULO 2	33
2	METODOLOGÍA	33
2.1	FLUJOGRAMA DE TRABAJO	33
2.1.1	DESCRIPCIÓN DEL FLUJOGRAMA DE TRABAJO	34
2.2	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	35
2.3	METODOLOGÍA A SEGUIR	37
2.3.1	ENTREVISTA.....	37
2.3.2	DATOS HISTÓRICOS.....	37
2.4	SOFTWARE A UTILIZAR	38
CAPÍTULO 3	39
3	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	39
3.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS CONVERTIDORAS.....	40
3.1.1	TIEMPO DE PREPARACIÓN.....	41
3.1.2	TIEMPO DE PROCESAMIENTO DE LÁMINA	41
3.1.3	TIEMPO DE TRABAJO PERMITIDO.....	42
3.1.4	TIPO DE CAJA.....	43
3.2	DESARROLLO DE LA PROBLEMÁTICA	43
3.2.1	PSEUDOCODIGO	45
3.2.2	IMPLEMENTACIÓN	45
3.3	RESULTADOS.....	51
3.3.1	ANÁLISIS COMPARATIVO	53
3.3.2	REDUCCIÓN DE COSTOS.....	54
3.3.3	POSIBILIDADES DE MEJORA	55

CAPÍTULO 4	57
4 CONCLUSIÓN	57
4.1 RECOMENDACIONES	57
4.2 CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59
APÉNDICES	60
APÉNDICE A	60
APÉNDICE B	61
APÉNDICE C	62
APÉNDICE D	63
APÉNDICE E	64
APÉNDICE G	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema del Proceso de Producción.	14
Figura 1.2 Diagrama del Proceso de Corrugado.	16
Figura 1.3 Diagrama del Proceso de Conversión.	18
Figura 1.4 Tiempo Improductivo por Área.	19
Figura 1.5 Costos de Almacenaje por Área de Producción.	20
Figura 1.6 Ubicación de las Máquinas en la Fábrica.	21
Figura 1.7 Lámina de Cartón Single Face.	25
Figura 1.8 Lámina de Cartón Double Face.	25
Figura 1.9 Tipo de cajas.	26
Figura 1.10 Ondulaciones y Flautas.	27
Figura 1.11 Estructura de la Máquina Convertidora.	28
Figura 1.12 Secuencia del Procesamiento.	30
Figura 1.13 Estructuras de un MRP.	31
Figura 2.1 Flujograma de Trabajo.	33
Figura 2.2 Cronograma de Actividades a Seguir 1/2.	35
Figura 2.3 Cronograma de Actividades a Seguir 2/2.	36
Figura 2.4 Wolfram Mathematica.	38
Figura 3.1 Makespan del proceso de conversión.	39
Figura 3.2 Diagrama de Gantt del día 5.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Detalle de Actividades a Realizar.....	34
Tabla 3.1 Especificaciones Técnicas de una Máquina Convertidora.	40
Tabla 3.2 Tiempos de Preparación.	41
Tabla 3.3 Velocidad de Procesamiento.....	42
Tabla 3.4 Tiempo Límite de Trabajo.....	42
Tabla 3.5 Tipos de Cajas Permitidos.....	43
Tabla 3.6 Ejemplo de Pedido.	44
Tabla 3.7 Planificación del día 1.	46
Tabla 3.8 Planificación del día 2	47
Tabla 3.9 Planificación del día 3.	48
Tabla 3.10 Planificación del día 4.	49
Tabla 3.11 Planificación del día 5.	50
Tabla 3.12 Resultado de la Implementación.	52
Tabla 3.13 Comparación de Esperas.	53
Tabla 3.14 Costos de Almacenamiento semanal.	54

ABREVIATURAS

PFSSP	The Permutation Flow Shop Scheduling Problem. (Problema de programación de estaciones de trabajo.)
MPS	The Multi-Item Master Production Scheduling. (Programación master de la producción multi-ítem)
MRP	Material Requirements Planning.) (Planificación del requerimiento de materiales.)
GRASP	Greedy Randomize Adaptive Search Procedure. (Procedimiento codificado de búsqueda adaptativa aleatorizada.)

GLOSARIO

Corrugadora:

Máquina que sirve para la creación de las láminas de cartón corrugado.

Convertidora:

Máquina que sirve para el procesamiento de las láminas de cartón corrugado.

Doble Face:

Compuesta por tres papeles liner y dos médiums corrugados.

Demanda:

Solicitud de un bien o servicio específico por parte de un cliente.

Liner:

Lámina fina de cartón sin ondulaciones.

Medium:

de cartón con ondulaciones [1].

Makespan:

En la fabricación, la diferencia de tiempo entre el inicio y el final de una secuencia de trabajos o tareas [2].

Pentek:

Banda transportadora donde son colocadas las pilas de láminas de cartón para alimentar las máquinas convertidoras [1].

Single Face:

Lámina Compuesta por dos papeles liner y un médium corrugado [1].

CAPÍTULO 1

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

La empresa ubicada en el cantón Machala de la provincia del Oro, tiene como meta principal la mejora del sistema de producción de cajas de cartón corrugado, por lo que es necesario tomar en cuenta la evolución del mercado. El constante cambio de los empaques, cajas y contenedores de productos no solo provoca una necesidad de nueva tecnología si no también un constante ajuste de las máquinas ya existentes en la fábrica. Por tal motivo resulta indispensable buscar metodologías para lograr un mejor aprovechamiento de la materia prima que en este caso son las bobinas de papel, para la mejor comprensión del presente trabajo se analizara el proceso de producción en dos partes principales. La primera parte es la fabricación de las láminas de cartón corrugado y la segunda parte es la conversión de las láminas.

La línea de producción inicia con elaboración de las láminas de cartón en la máquina corrugadora, donde las bobinas de papel son sometidas a un proceso de corrugado para obtener láminas con combinaciones de papel según el tipo de caja a fabricar. La siguiente etapa es la conversión de las láminas corrugadas en las máquinas convertidoras, donde las láminas son impresas y troqueladas al mismo tiempo en un lapso de tiempo muy corto, las máquinas convertidoras necesitan ser preparadas según el tipo de caja a fabricar. Finalmente, el producto terminado es separado y preparado según las necesidades del cliente para luego ser trasladado a la bodega, donde los pedidos esperan al despacho respectivo. A continuación, se presenta un esquema donde muestra la línea de producción con sus respectivas máquinas, segmentadas por área de trabajo.

1.2 SITUACIÓN ACTUAL

La fábrica cartonera considera el proceso de corrugado y el de conversión como los más importantes dentro de la cadena de valor, estos grandes procesos son los generadores de la mayoría de actividades adicionales: almacenamiento del producto en todas sus etapas, mantenimientos, trabajo manual, preparación de pedidos. A continuación, una gráfica explicando de manera general el proceso de producción.

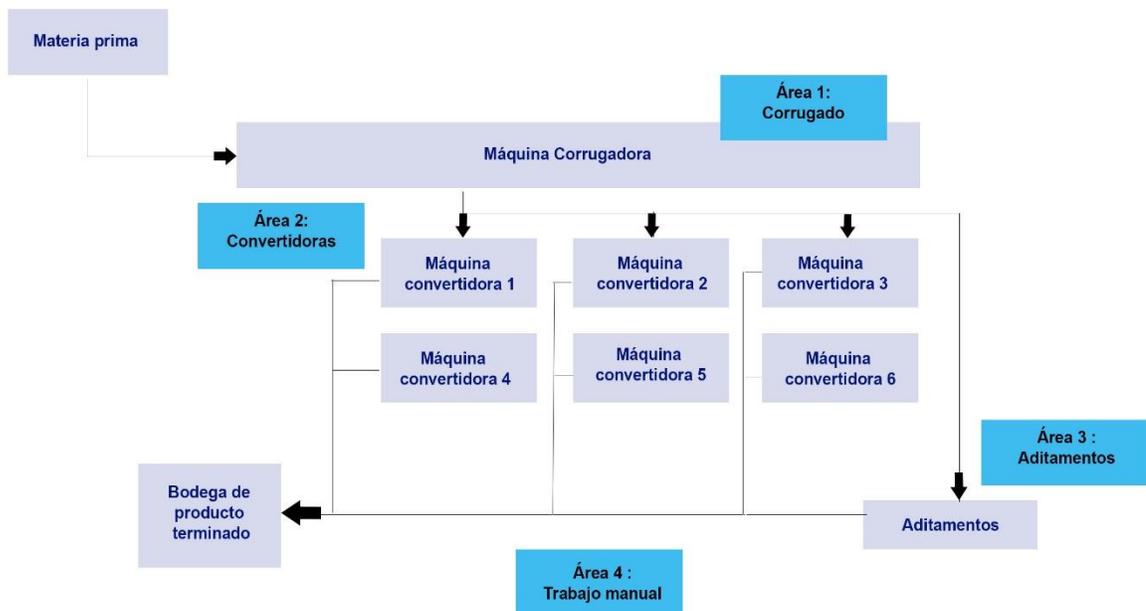


Figura 1.1 Esquema del Proceso de Producción.

Fuente: Elaboración propia.

1.2.1 SITUACIÓN ACTUAL EN EL ÁREA DE CORRUGADO

Actualmente la máquina corrugadora realiza el corte de las órdenes según la programación realizada por el software, dicho software programa las órdenes dependiendo de su fecha de entrega y las dimensiones de la caja a fabricar con el fin de lograr un máximo aprovechamiento en cada corrida de producción.

Una buena programación de la máquina corrugadora en este punto de la cadena es indispensable ya que el costo de los residuos y el mal aprovechamiento de las dimensiones de la bobina de papel es demasiado alto. A continuación, se muestra un diagrama de este proceso.

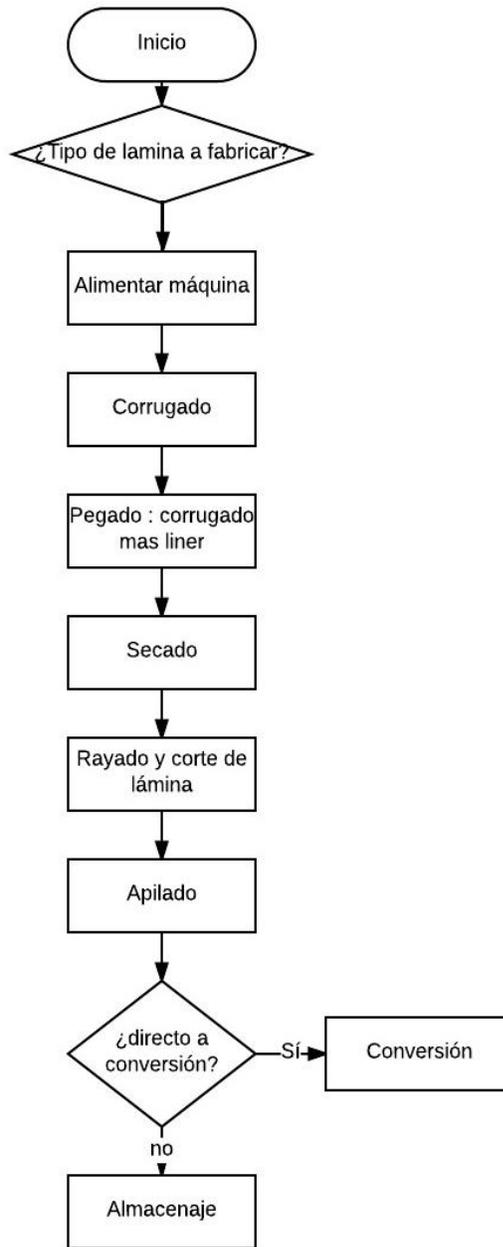


Figura 1.2 Diagrama del Proceso de Corrugado.
Fuente: Elaboración propia.

1.2.2 SITUACIÓN ACTUAL EN EL ÁREA DE CONVERSIÓN

Dentro del área de conversión actualmente existen 6 máquinas convertidoras operativas totalmente diferentes, cada una de estas máquinas cuenta con características propias en cuanto a: velocidad de procesamiento, tiempos de preparación, paradas obligatorias y tipo de caja a producir.

El modo en que actualmente está operando el área de conversión se relaciona directamente con la etapa de corrugación es decir los pedidos u órdenes de trabajo son procesadas conforme van terminando su proceso de corrugación. Dentro de esta área de conversión se llevan a cabo otras actividades como el almacenamiento del producto semi terminado (láminas antes de conversión), trabajo manual al final de la conversión y la preparación de aditamentos necesarios para cada pedido.

Las láminas que están listas para ser convertidas son colocadas en una banda transportadora que alimenta las máquinas convertidoras según su disponibilidad, si su tiempo de espera hasta ser procesadas es demasiado largo o si alguna máquina Convertidora no se encuentra en condiciones operativas las láminas son colocadas en un área acondicionada especialmente para la espera. A continuación, se muestra un diagrama del proceso de conversión de las láminas de cartón corrugado.

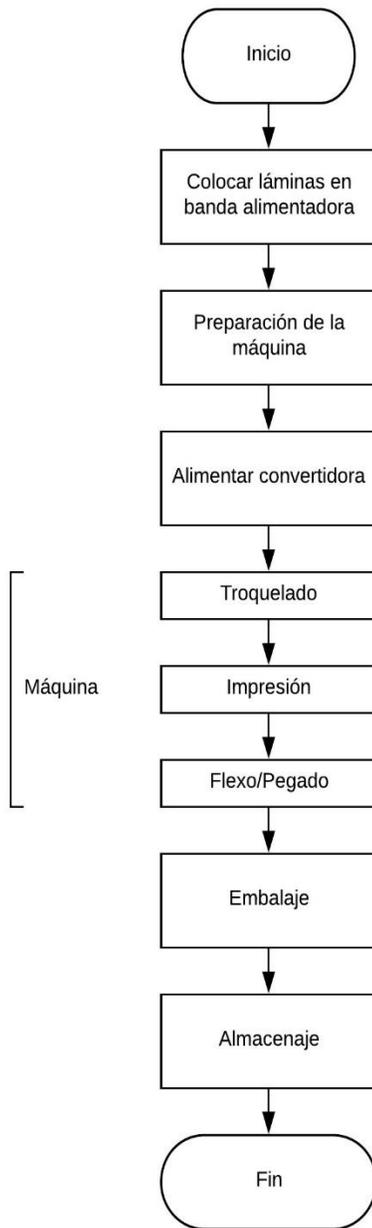


Figura 1.3 Diagrama del Proceso de Conversión.

Fuente: Elaboración propia.

1.2.3 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Para lograr una mejor comprensión de la situación actual de la planta se analizaron los siguientes factores comparativos:

- a) Tiempo improductivo
- b) Costo de inventario

Tiempos Improductivos

Se tomó el tiempo improductivo relacionado a paros no programadas, estos tiempos generalmente se producen cuando las máquinas están a la espera de materia prima en el caso de la corrugadora o a la espera de láminas de cartón en el caso de las convertidoras, adicionalmente dentro de estos tiempos también se ha considerado paros obligatorias por fallos técnicos en las maquinarias. En la siguiente grafica se compara el tiempo improductivo contra el tiempo productivo programado de cada área.

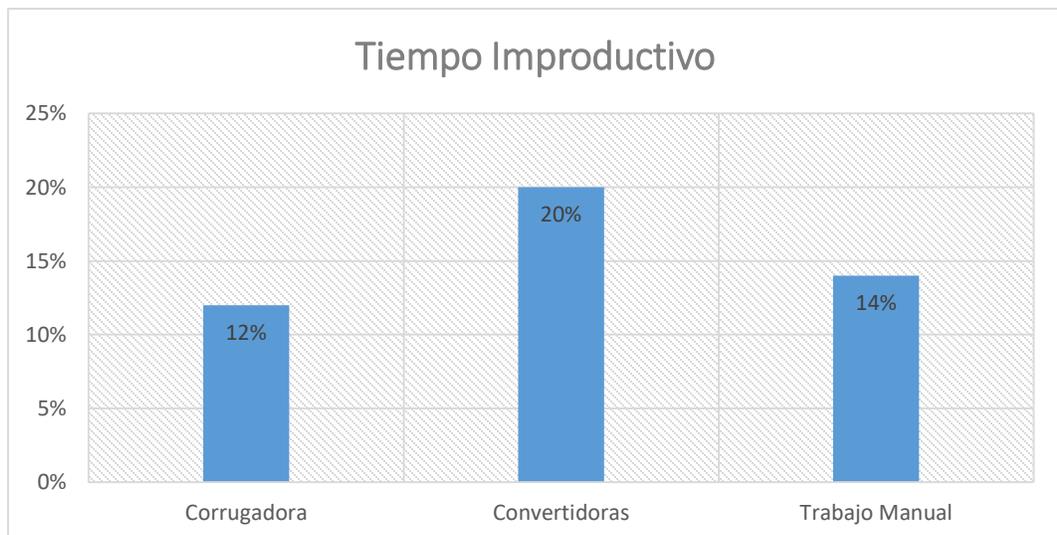


Figura 1.4 Tiempo Improductivo por Área.

Fuente: Dep. de Planificación jul. 17- sep. 17.

Como se puede observar claramente el área de conversión tiene el un mayor porcentaje de tiempo improductivo, muchas veces estos tiempos son provocados por retrasos de corte en la máquina corrugadora, pues esta organiza los cortes de tal manera que el ancho y largo de la bobina será aprovechado al máximo, es importante recordar que dentro de esta área también se considera tiempo improductivo la espera de órdenes antes de ser procesadas. (Apéndice B)

Costos de Almacenamiento

Los costos por mantener producto semi terminado o producto terminado en las áreas de producción se muestra en la siguiente gráfica.

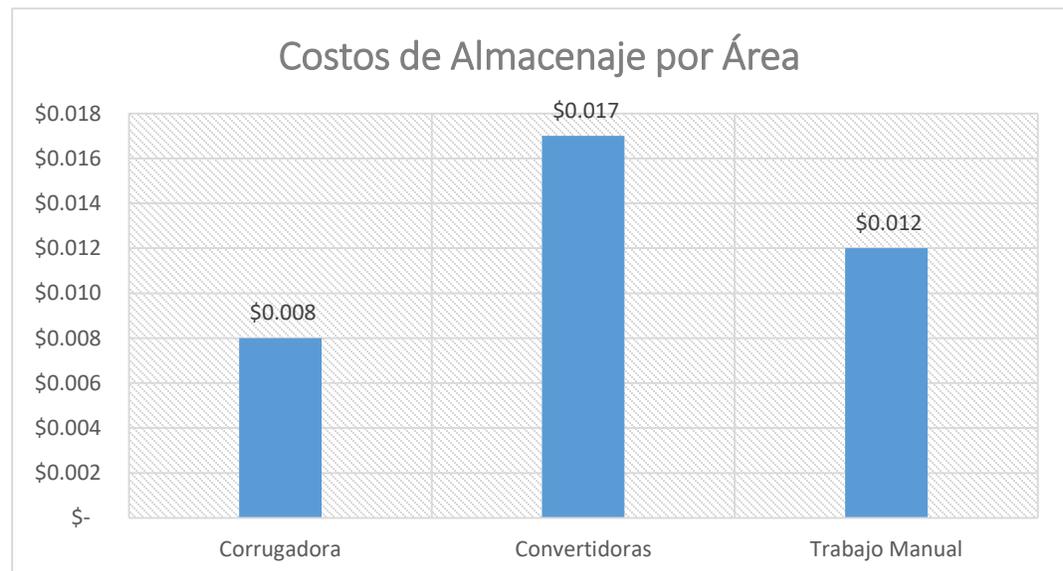


Figura 1.5 Costos de Almacenaje por Área de Producción.

Fuente: Dep. de Planificación.

El costo de almacenaje por unidad los obtenemos mediante la relación entre el costo total por conceptos de almacenaje en cada área de

producción y las unidades (láminas o cajas) que en algún determinado momento tuvieron que ser almacenadas. (Apéndice C)

Se puede observar claramente que en el área de conversión existe un valor generado por almacenaje mucho más alto comparado con los demás procesos lo cual significa que una cantidad considerable de pedidos han pasado por la zona de almacenamiento durante su transcurso por el área de conversión.

1.3 DIAGRAMA DE LA PROBLEMÁTICA

En el siguiente diagrama los dos pasos marcados de color rojo son etapas donde las láminas de cartón esperan para ser procesada.



Figura 1.6 Ubicación de las Máquinas en la Fábrica.

Fuente: Elaboración propia.

1.4 HIPÓTESIS

Teniendo en cuenta que al final del día lo más importante es el número de láminas que son procesadas en cada turno, los tiempos de espera antes y después de la fase de conversión son un factor que está afectando directamente a productividad de la planta, siendo lo ideal una correcta sincronización entre la fase de corrugación y conversión.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVOS GENERALES

Diseñar una propuesta para mejorar el rendimiento del área de máquinas convertidoras de la fábrica de cajas de cartón, tomando en cuentas las limitaciones existentes en el entorno.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Construir un algoritmo metaheurístico basado en la temática Scheduling Flow Shops (PFSSP) con el fin de planificar las máquinas convertidoras.
- Implementar el algoritmo a manera de prueba para lograr un contraste.
- Verificar si los tiempos de espera que existen antes de la conversión sufrieron una reducción.
- Verificar si la implementación del algoritmo representara algún beneficio económico para la empresa cartonera.

1.6 MARCO TEÓRICO

1.6.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

En la siguiente sección se expondrán artículos sobre estudios realizados durante los últimos años respecto a la temática del proyecto.

Artículo N.1

Nombre de la publicación: Improved performance by integrated corrugator and convertor scheduling

Autor: J. (Jeroen) Kars

Universidad: University of Twente

Fecha de publicación: 19 septiembre 2014

Resumen:

La investigación es parte de la maestría en ingeniería industrial de la universidad de Twente (Países Bajos), la investigación tiene como objetivo facilitar la tarea de planificar y programar el proceso de producción ofreciendo información valiosa para lograr una reducción considerable en los tiempos de preparación de los pedidos.

El investigador decidió modelar las diferentes tareas en módulos que resuelven los problemas por separado en lugar de resolver todo el problema a la vez. La solución consiste en cinco módulos: un módulo de selección de pedidos, un módulo para el problema de corte, programación del corrugador, un módulo de programación de conversión y un módulo Pentek (zona de buffer).

La función objetivo planteada por el investigador muestra con resultados cuantificables al momento de minimizar; duración total de la ejecución, la pérdida durante el ajuste y la cantidad de desperdicio que se genera en el corte.

Dirección electrónica: <http://essay.utwente.nl/65965/>

1.6.2 MARCO CONCEPTUAL

1.6.2.1 CARTÓN CORRUGADO

Las cajas de cartón corrugado se utilizan para transporte de mercadería, desde frutas y verduras hasta máquinas industriales. La función primordial es proteger los elementos que contienen mediante un sistema especial de amortiguación. Sus características livianas, resistentes y económicas las

han convertido en el método más popular y efectivo de embalaje para transportar bienes manufacturados.

Está formado por capas de papel, habitualmente denominadas liners y ondas. Los liners son papeles sin ondular, mientras que las ondas son papeles acanalados que se adhieren a los liners mediante pegamento. Existen varios tipos de cartón corrugado: corrugado de una cara (un liner y una onda), corrugado sencillo (dos liners y una onda), doble corrugado (tres liners y dos ondas intercalados).

Una línea de producción de cartón corrugado es una secuencia de pasos donde se transforman bobinas de papel en cajas de cartón. El papel es tratado mediante diferentes niveles de calor y humedad para hacerlo más flexible al momento del corrugado, luego se realiza el proceso de acanalado hasta obtener la onda. La siguiente fase consiste en pegar los liners y las ondas, para lo cual se utiliza calor y adhesivo. Por último, este flujo continuo de cartón corrugado pasa por una etapa de cortes longitudinales y transversales para formar planchas rectangulares según las especificaciones puntuales de cada pedido. Estas planchas se estacionan en bancales o pallets durante unas horas, y luego pasan por los procesos de impresión, troquelado y pegado. Las líneas punteadas corresponden a los trazadores, que se utilizan para plegar la caja y hacer que tome su forma final. El resultado final es una caja impresa y pegada.

1.6.2.2 LÁMINAS

Es parte del producto en proceso. Lo componen dos diferentes tipos de papeles, que se combinan en diferentes tipos de láminas. A continuación, cuales son estos tipos:

Single Face: Compuesta por dos papeles liner y un médium corrugado.

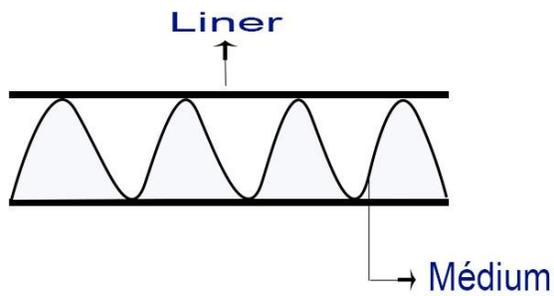


Figura 1.7 Lámina de Cartón Single Face.

Fuente: Elaboración propia.

Double Face: Compuesta por tres liners y dos médiums.

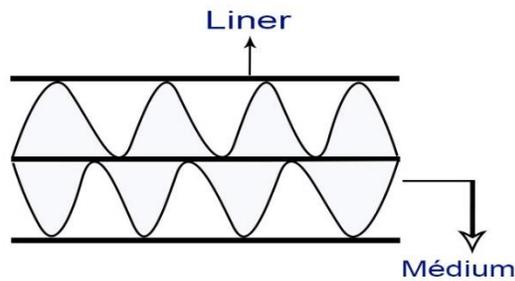


Figura 1.8 Lámina de Cartón Double Face.

Fuente: Elaboración propia.

1.6.2.3 CAJAS

Una vez que las láminas pasan por las máquinas convertidoras, se obtiene su producto estrella, que son las cajas de cartón plegadizas impresas de uno a cuatro colores. Estas pueden incluir troquelados (perforaciones) para dar un acabado adicional al producto. A continuación, se muestra los tipos de cajas que se elaboran.

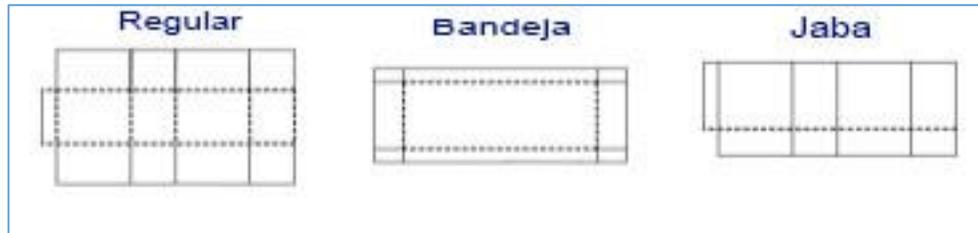


Figura 1.9 Tipo de cajas

Fuente: Elaboración propia

1.6.2.4 ADITAMENTOS

Son los accesorios utilizados por algunas de las cajas, para asegurar el almacenaje del producto al cliente. Estos pueden ser separadores de producto, largueros, transversales, refuerzos.

1.6.2.5 DEPARTAMENTO DE CORRUGADO

La corrugadora es la máquina que hace las hojas de cartón ondulado, este cartón ondulado se compone de diferentes capas de papel, la fábrica tiene la capacidad de producir hojas de una sola pared y de doble pared, para las láminas simples utilizan tres capas de papel: una capa inferior una capa de flauta u ondulada y una capa superior. Para las láminas doble pared se utilizan dos capas onduladas de diferentes tipos de rodillos. La máquina corrugadora es capaz de fabricar 8 tipos diferentes de cartón corrugado, cuatro de pared simple y cuatro de doble pared, por otra parte, también hay diferentes tipos de calidad debido a los diferentes tipos de papel.



Figura 1.10 Ondulaciones y Flautas.
Fuente: <http://www.jgcarton-machine.com>

RESIDUOS

El departamento de planificación por medio del software que utiliza la máquina corrugadora intenta planificar los cortes de tal manera que se aproveche al máximo las dimensiones de la bobina de papel y lograr que los residuos que se generan al cortar sean mínimos.

1.6.2.6 DEPARTAMENTO DE CONVERSIÓN

El Departamento de Conversión consta de 6 máquinas. Algunas máquinas tienen las mismas características y pueden procesar las mismas órdenes. En las máquinas de conversión, láminas de cartón ondulado se imprimen con tinta y además le da forma a la caja cortando si es necesario. Al final de cada máquina las cajas de cartón se apilan unas sobre otras. Las pilas se transportan a una zona de transportadores automatizados. Las dimensiones de las láminas también determinan qué máquina se puede utilizar. Las máquinas tienen diferentes velocidades de producción.

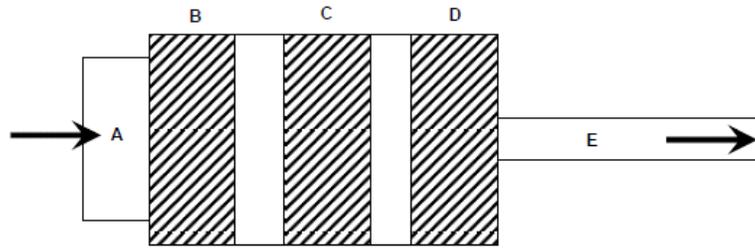


Figura 1.11 Estructura de la Máquina Convertidora.

Fuente: Elaboración propia.

- a) Mesa alimentadora
- b) Cuerpo rayador
- c) Cuerpo impresor
- d) Cuerpo troquelador
- e) Puente de la máquina

1.6.3 MODELOS MATEMÁTICOS

1.6.3.1 MODELO DE PROGRAMACIÓN FLOW SHOP (PFSSP)

Por lo general las estaciones consisten de un número m finito de máquinas que están conectadas en serie por medio de una especie de banda que transporta productos o la materia prima a ser procesada este sistema también conocido como buffers, en este tipo de modelos es muy importante determinar el orden de la secuencia de entrada de los productos

Formulación básica

i = estaciones de procesamiento, $i = \in \{1 \dots m\}$

k = partes o productos a ser procesados, $k = \in \{1 \dots n\}$

Variables de decisión

P_{kl} = 1 si parte k toma la posición l , 0 sino.

C_{li} = tiempo de comienzo de procesamiento de la posición l en la estación i .

d_{li} = tiempo en que se completa el procesamiento de la posición k en la estación i .

Total = tiempo desde el primer proceso hasta el último, más el tiempo entre procesos.

Modelo

En esta restricción queremos lograr que cada posición sea procesada.

$$\sum_{k=1}^n P_{kl} = 1 \quad \forall l$$

En esta restricción queremos que a cada estación se le asigne una sola posición.

$$\sum_{l=1}^n P_{kl} = 1 \quad \forall k$$

En esta restricción relacionamos el tiempo que la posición l se demoró dentro de estación i y el tiempo de comienzo del procesamiento de la posición l en estación $l + 1$.

$$C_{l+1,i} \geq d_{li} \quad \forall l \quad \forall i$$

En esta restricción relacionamos el tiempo en que la posición l sale de la estación i y el tiempo en que la parte $l+1$ entra a la estación i .

$$C_{l,i+1} \geq d_{li} \quad \forall l \quad \forall i$$

En esta restricción relacionamos el tiempo de procesamiento hasta la posición l en la estación i con el tiempo que comienza su procesamiento y el tiempo fijado de procesamiento.

$$d_{li} \geq C_{li} + \sum_{k=1}^n t_{ik} p_{kl} \quad \forall l \quad \forall i$$

Tiempo total de proceso está dado por el tiempo en que se termina de procesar la última parte en la última estación.

$$Total \geq d_{lm}$$

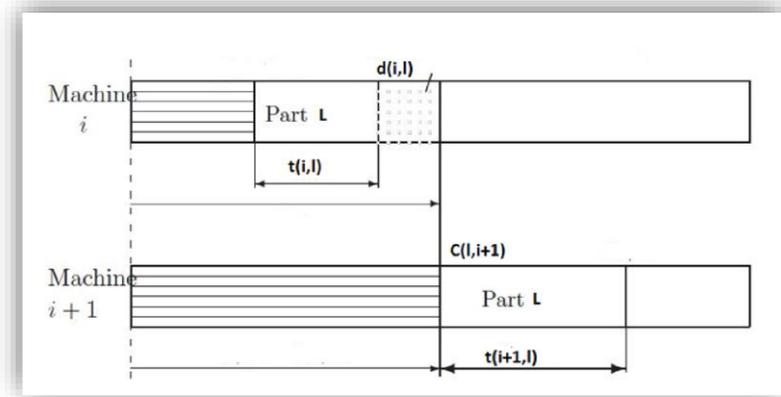


Figura 1.12 Secuencia del Procesamiento.

Fuente: Elaboración propia.

1.6.3.2 PLANIFICACIÓN DE REQUERIMIENTO DE MATERIALES (MRP)

Este modelo describe un sistema de producción multinivel, donde se integra un modelo de planificación de la producción de productos terminados con un modelo de planificación de productos intermedios y el requerimiento de materiales, el propósito de estos modelos es optimizar simultáneamente la producción de todos los componentes utilizados para fabricar los productos terminados y todos los materiales utilizados durante este proceso de fabricación, con el fin de satisfacer una demanda durante un periodo determinado de tiempo. En la siguiente imagen se muestra la estructura de la dependencia de productos o ítems entre sí.

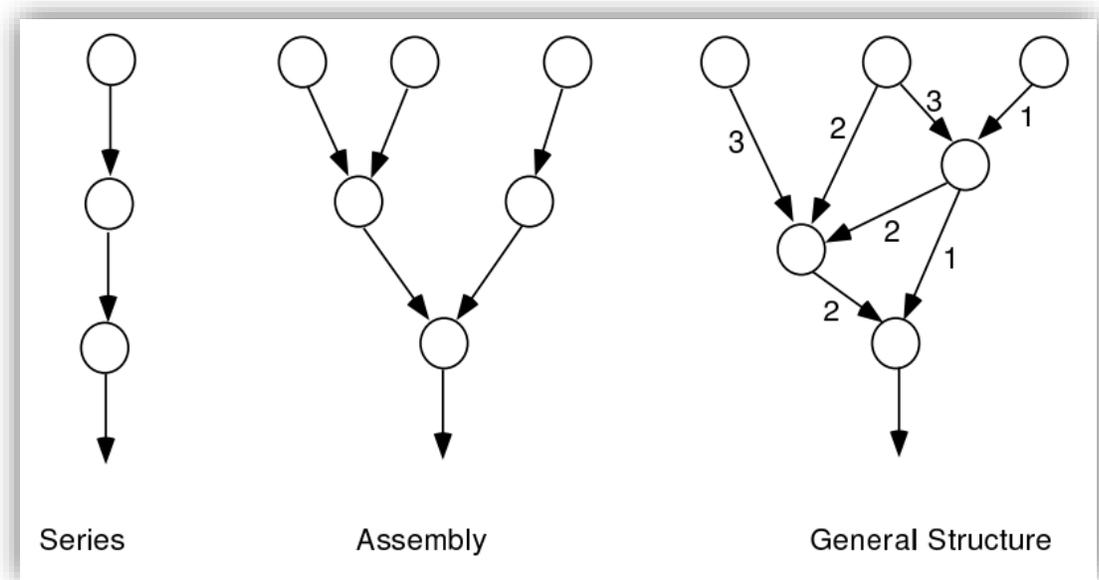


Figura 1.13 Estructuras de un MRP.

Fuente: Elaboración propia.

Para la formulación matemática usaremos el índice $i = 1, \dots, \epsilon$ S que identifica los ítems, $(i, j) \in S$ que representa la relación de requerimiento entre ítems i y j denotado por r_{ij} este parámetro r es usado para identificar la demanda dependiente, mientras que la demanda independiente es denotada por d_{it} que significa la demanda por cada tipo de ítem durante el periodo t , mientras que $\gamma(i)$ representa el lead time de producir un lote de ítem i comenzando en un periodo t y terminado en un periodo $t + \gamma(i)$.

Formulación general

$$\text{Función Objetivo } \mathbf{Min} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m \{ \mathbf{p}_{i,t} + \mathbf{x}_{i,t} + \mathbf{f}_{i,t} + \mathbf{h}_{i,t} \mathbf{s}_{i,t} \}$$

Sujeto a:

$$s_{i,t-1} + x_{i,t-\gamma(i)} = [d_{i,t} + \sum_{i,j}^n r_{i,j}x_{j,t}] + s_{i,t} \quad \forall i, t$$

$$x_{i,t} \leq My_{i,t} \quad \forall i, t$$

$$\beta_{i,k}x_{i,t} \leq \sum_{i=1}^n l_{k,t} \quad \forall t, k$$

$$x_{i,t} s_{i,t} \geq 0 \quad y_{i,t} \in \{0,1\}$$

Donde $x_{i,t}$ es la variable de producción definida para cada periodo y tipo de ítem, $y_{i,t}$ es la variable binaria de decisión que indica si se produce o no en el periodo t , respecto al requerimiento de la materia prima existe una limitación denotada por $L_{k,t}$. El inventario también tiene su costo $h_{i,t}$ asociado a una variable $s_{i,t}$ que indica el nivel de inventario cada día t .

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGÍA

2.1 FLUJOGRAMA DE TRABAJO

En el siguiente flujograma se explica la forma en la cual se llevará a cabo el desarrollo del proyecto.

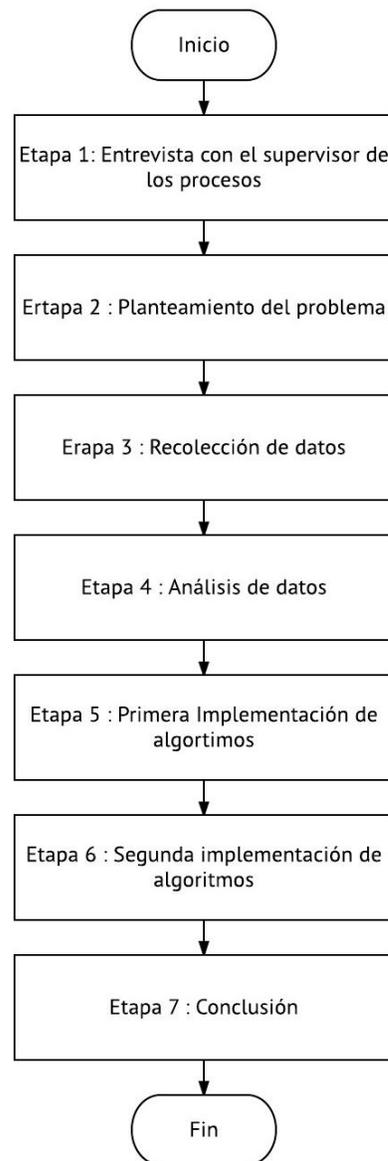


Figura 2.1 Flujograma de Trabajo.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL FLUJOGRAMA DE TRABAJO

Etapa 1
Act 1. Entrevista con el supervisor del proceso de conversión
Etapa 2: Planteamiento del problema
Act 1. Identificación de las posibles problemáticas
Act 2. Planteamiento de la problemática
Act.3. Fijación de los objetivos
Act. 4. Presentación del avance del capítulo 1
Act. 5. Elaboración del marco conceptual
Act. 7. Análisis de los algoritmos matemáticos a usar
Act. 8. Determinación del software a usar
Act. 9. Presentación del Avance del Capítulo 2
Etapa 3 : Recolección de datos
Act. 1. Identificación de tiempos en proceso de conversión
Act. 2. Aditamentos y procesos de preparación
Act. 3. Capacidad de almacenamiento
Etapa 4 : Análisis de datos
Act.1. Ajuste de datos
Act. 2. Preparación de algoritmos a usar
Etapa 5 : Primera implementación de algoritmos
Act. 1. Formato de datos
Act. 2. Modelización de algoritmo FS en software
Act. 3. Análisis de los resultados de primera implementación
Act. 4. Ajustes necesarios
Etapa 6 : Segunda implementación de algoritmos
Act. 1. Formato de datos
Act. 2. Modelización de algoritmo FS en software
Act. 3. Presentación capítulo 3 y 4
Act. 4. Análisis de los resultados de segunda implementación
Act. 5. Ajustes necesarios
Etapa 7 : Conclusión
Act.1 Análisis de resultados Y Elaboración de propuesta final
Act. 2. Elaboración de poster
Act. 3. Presentación preliminar
Act. 4. Sustentación Final

Tabla 2.1 Detalle de Actividades a Realizar.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

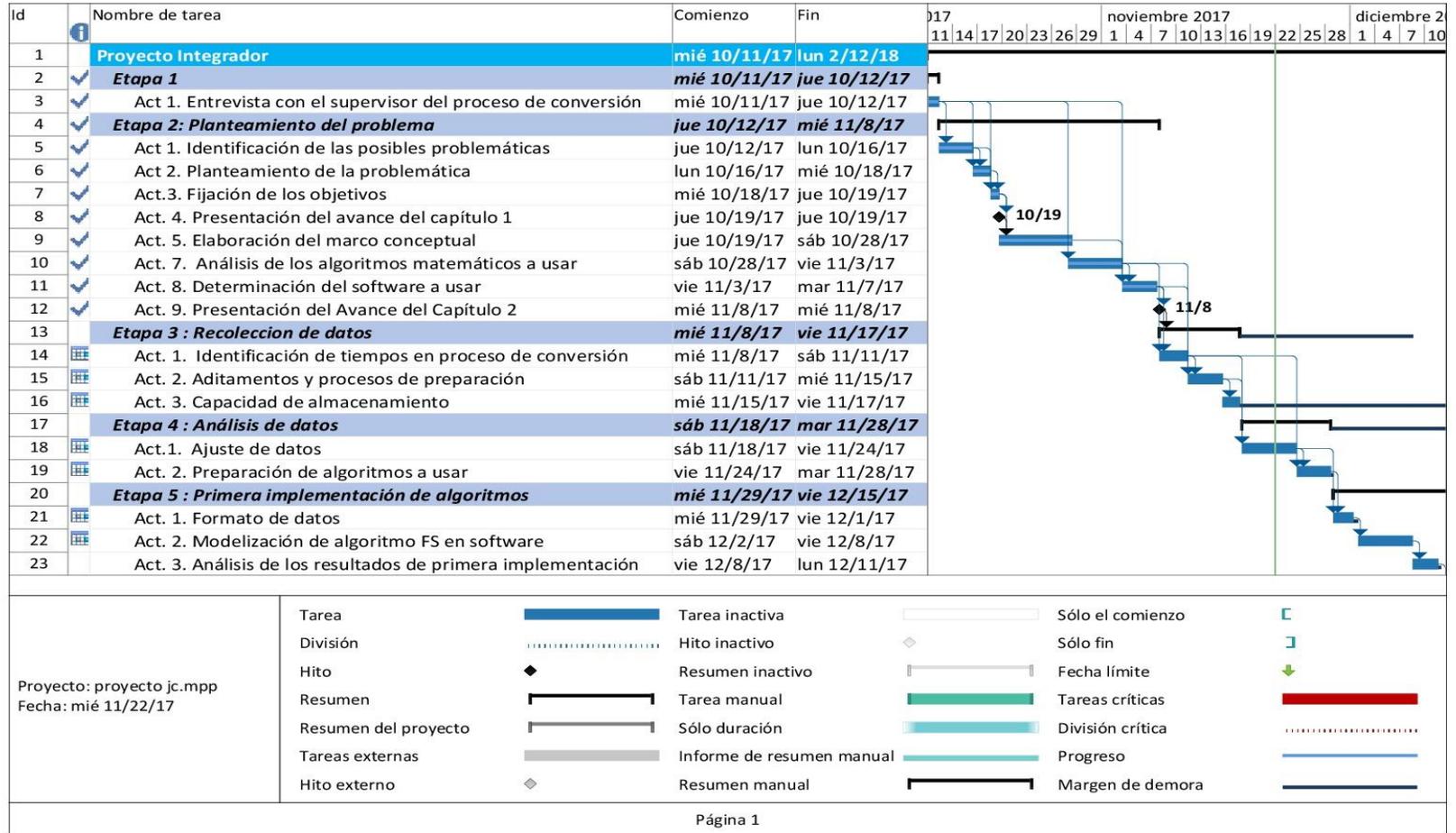


Figura 2.2 Cronograma de Actividades a Seguir 1/2.

Fuente: Elaboración propia.

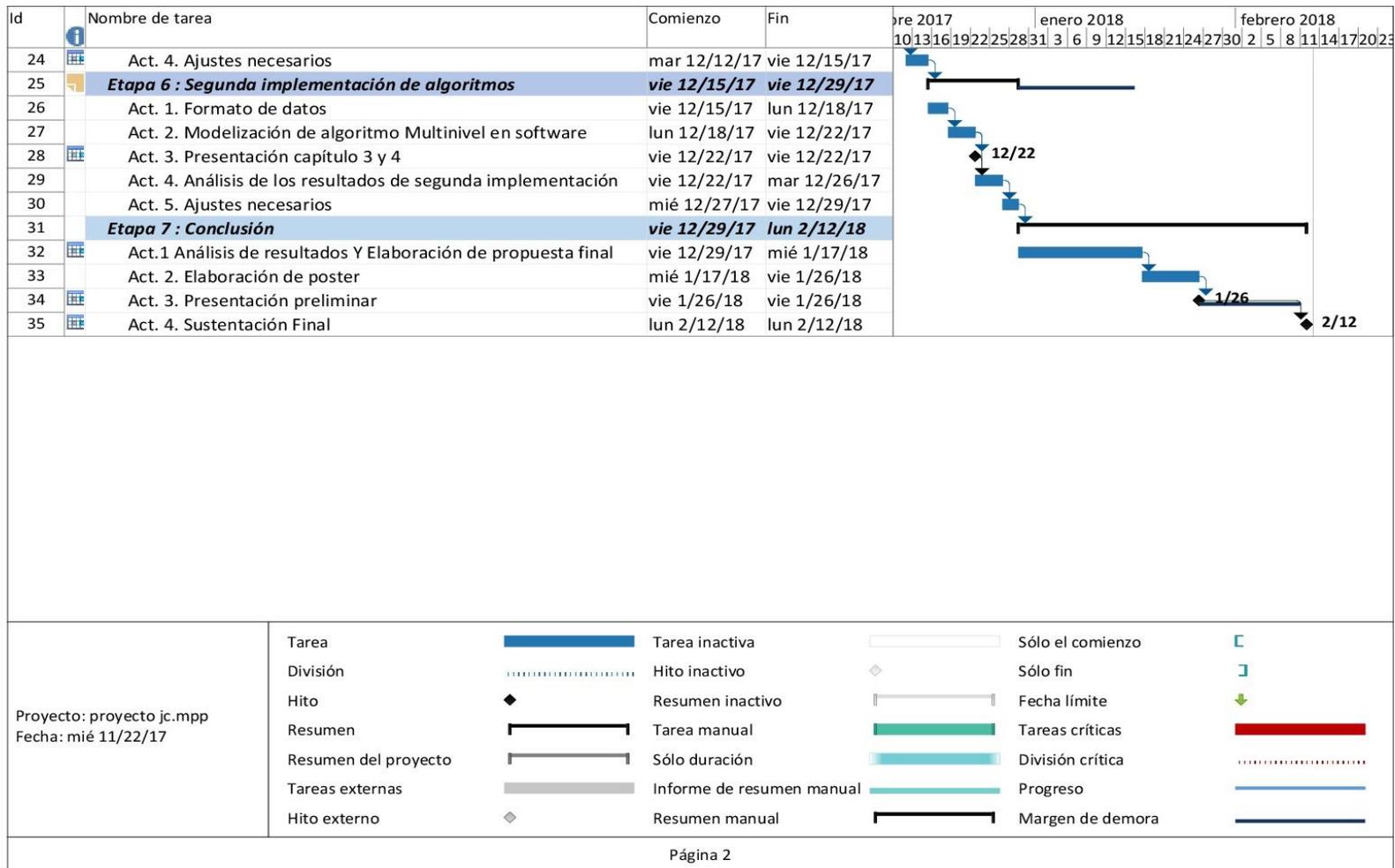


Figura 2.3 Cronograma de Actividades a Seguir 2/2.

Fuente: Elaboración propia.

2.3 METODOLOGÍA A SEGUIR

A continuación, se detallan los métodos que se utilizarán para obtener y procesar la información con el fin de cumplir los objetivos del proyecto.

2.3.1 ENTREVISTA

Por medio de este método se obtendrá información muy importante acerca de los procesos, dicha información que no se encuentra fácilmente documentada y es muy necesaria para analizar la posible problemática dentro del proceso de producción de las cajas.

En el presente trabajo se procedió a entrevistar al jefe del proceso de conversión utilizando una estructura de preguntas abiertas con el fin de obtener información acerca del funcionamiento de las máquinas en cada procesado, adicionalmente nos proporcionará detalles específicos acerca de sus limitaciones y necesidades. (Apéndice A)

2.3.2 DATOS HISTÓRICOS

Se solicitaron de manera formal datos históricos del comportamiento del proceso de conversión, se tomaron en cuenta factores como la productividad, tiempos de inactividad, residuos, con la finalidad de analizar a la situación actual del proceso.

2.4 SOFTWARE A UTILIZAR

El software a utilizar para la implementación del algoritmo matemático en el presente trabajo es Wolfram Mathematica 11.0. Este importante Software de programación fue creado por Stephen Wolfram en el año de 1988, actualmente es el producto principal de la empresa Wolfram Research. Actualmente se usa en áreas científicas, de ingeniería, matemática y áreas computacionales. Mathematica es también un poderoso lenguaje de programación de propósito general, La filosofía de Wolfram Language es automatizar tanto como sea posible, para que los programadores puedan concentrarse en definir lo que quieren hacer, y el lenguaje automáticamente determinará cómo hacerlo.

Datos importantes:

- Disponible para Windows, Linux, Mac.
- Mathematica cuenta con alrededor de 5.000 funciones integradas.
- Sistema que es fácil de usar, con sugerencias predictivas, entrada de lenguaje natural.
- Sofisticada estética computacional y galardonado diseño, Mathematica presenta sus resultados creando de forma instantánea las mejores visualizaciones interactivas.
- El costo de la licencia para usar Mathematica varía entre 1,350\$ hasta 7,570\$ dependiendo del área de aplicación y el número de usuarios necesarios.

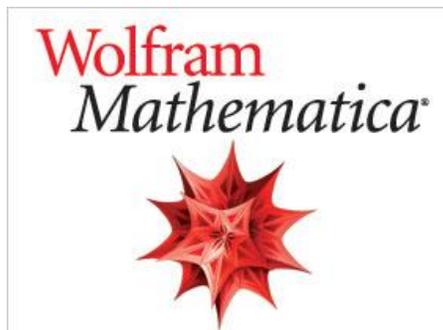


Figura 2.4 Wolfram Mathematica.

Fuente: <https://www.wolfram.com>.

CAPÍTULO 3

3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

En el siguiente capítulo se determinará la información necesaria para la correcta implementación de un algoritmo metaheurístico GRASP basado en el modelo Flow Shop sobre el proceso de conversión de las láminas de cartón corrugado.

Es importante recordar que en el área de conversión existen 6 máquinas convertidoras con diferentes características de trabajo las cuales será detalladas más adelante, la finalidad de usar este algoritmo es reducir el Makespan que se genera desde que las láminas salen de la maquina corrugadora hasta el final del proceso de conversión.

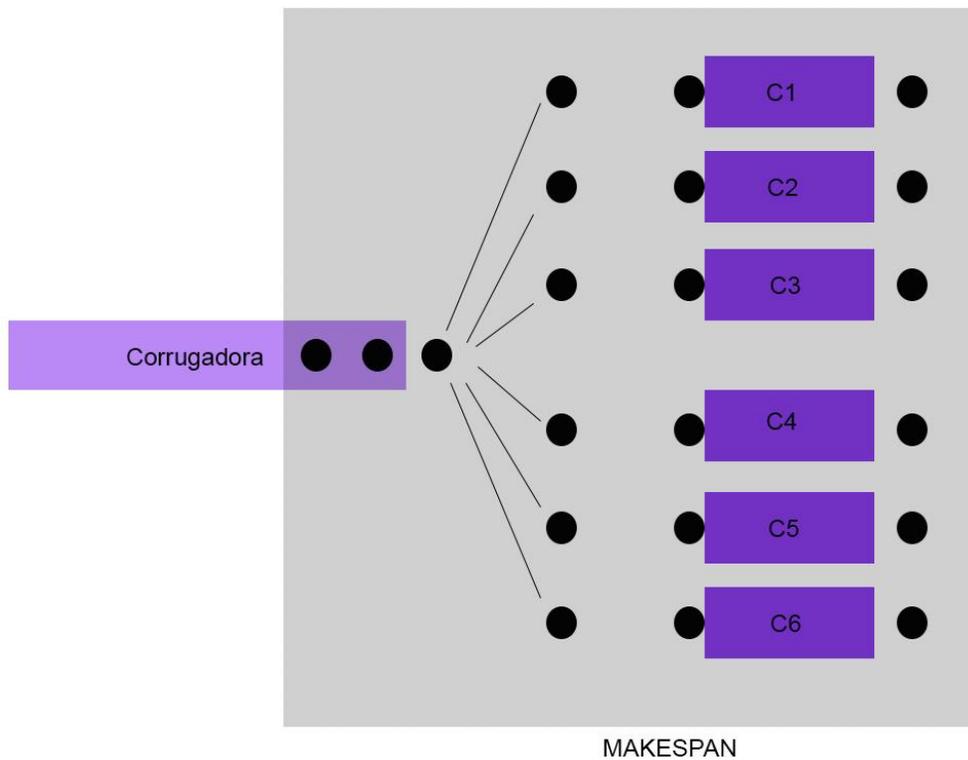


Figura 3.1 Makespan del proceso de conversión

Fuente: Elaboración Propia

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS CONVERTIDORAS

Las 6 máquinas que existen dentro de la planta son diferentes respecto a su funcionamiento a continuación se presentan los factores característicos que se han tomado en cuenta para lograr una mejora en el rendimiento del área de conversión.

- El tiempo de preparación.
- Tiempo de procesamiento de una lámina.
- Tiempo de funcionamiento permitido.
- Tipo de caja.

Básicamente una máquina convertidora tiene las siguientes características técnicas:

Especificaciones				
Max Tamaño de la hoja(mm)	1200 x2600	1200x2900	1600x2600	1600x3100
Max. Área de impresión(mm)	1150x2490	1150x2890	1550x2490	1550x2990
Max. Rapidez de operación (pcs/min)	150	150	130	130
Espesor de la placa estándar (mm)	7.2			
Min. Distancia Ranurado (mm)	270x80			
Potencia máquina	45			
Peso(kg)	38000	38000	39000	38000
Dimensiones totales (LxAxA) (mm)	11000x5500x22000			

Tabla 3.1 Especificaciones Técnicas de una Máquina Convertidora.

Fuente: <https://www.bobst.com>.

3.1.1 TIEMPO DE PREPARACIÓN

El tiempo de preparación antes de procesar cada pedido es diferente en cada máquina porque son los aditamentos que se utilizan requieren de una manipulación por parte de los obreros, dentro de este tiempo también se encuentran actividades de limpieza.

Máquina	Tiempo de Preparación
Convertidora 1	30 min
Convertidora 2	20 min
Convertidora 3	25 min
Convertidora 4	30 min
Convertidora 5	28 min
Convertidora 6	23 min

Tabla 3.2 Tiempos de Preparación.

Fuente: Departamento de Conversión.

3.1.2 TIEMPO DE PROCESAMIENTO DE LÁMINA

El tiempo de procesamiento de cada lámina es el tiempo en que la máquina convertidora se demora en imprimir, troquelar y doblar la lámina, comenzando desde que la lámina entra al cuerpo de la máquina hasta cuando sale al puente transportador, en la siguiente tabla se especifica cuantas láminas puede procesar cada máquina por minuto de trabajo.

Máquina	Velocidad de procesamiento
Convertidora 1	100 pcs/min
Convertidora 2	130 pcs/min
Convertidora 3	150 pcs/min
Convertidora 4	100 pcs/min
Convertidora 5	100 pcs/min
Convertidora 6	130 pcs/min

Tabla 3.3 Velocidad de Procesamiento.

Fuente: Departamento de Conversión.

3.1.3 TIEMPO DE TRABAJO PERMITIDO

El tiempo de funcionamiento de cada máquina de manera corrida es limitado debido a que la compañía fabricante sugiere parar cada cierto tiempo por motivos de mantenimiento, la empresa cartonera tiene como política llevar un correcto mantenimiento preventivo de sus maquinarias por lo cual ha establecido tiempos para realizar estas actividades además con el fin de evitar un sobre esfuerzo de las máquinas.

Máquina	Tiempo Máximo de Trabajo continuo
Convertidora 1	4 horas
Convertidora 2	3 horas
Convertidora 3	4 horas
Convertidora 4	4 horas
Convertidora 5	3 horas
Convertidora 6	3 horas

Tabla 3.4 Tiempo Límite de Trabajo.

Fuente: Departamento de Conversión.

3.1.4 TIPO DE CAJA

Como se mencionó anteriormente todas las máquinas no pueden hacer todos los tipos de cajas, para el presente trabajo se estableció 3 tipo de cajas (regular, bandeja, jaba) ya que son las más importantes y sobre las cuales se fabrican variaciones respecto a impresión, tamaño y troquelado, a continuación, la tabla que indica que tipo de caja puede realizar cada máquina.

Máquina	Tipos Permitidos
Convertidora 1	1, 2
Convertidora 2	1, 2
Convertidora 3	3
Convertidora 4	2
Convertidora 5	1, 2
Convertidora 6	3

Tabla 3.5 Tipos de Cajas Permitidos.

Fuente: Departamento de Conversión.

3.2 DESARROLLO DE LA PROBLEMÁTICA

En la siguiente sección se construirá un algoritmo basado en el modelo de planificación Flow Shop anteriormente mencionado, luego del análisis de las características y limitaciones descritas en la sección anterior, el objetivo específico es lograr que las ordenes o pedido no tengan que esperar antes de ingresar a la fase de conversión.

Para comenzar con el desarrollo definimos como datos de entrada, la orden o pedido y la hora de finalización de su corte. Esta información se obtendrá directamente de la planificación de la corrugadora es decir el software de corrugación está en capacidad de indicar al operador de manera anticipada los tipos de caja que componen cada pedido y la hora exacta en que la máquina corrugadora terminará de cortar las láminas para completar la orden.

Núm. Pedido	Contenido			Hora de Salida
	T1	T2	T3	
1	5000	3000	0	9:30
2	0	2000	2000	10:15
3	6000	0	0	10:50
4	0	6000	0	11:30
5	3000	0	2000	12:00
6	0	0	5000	13:20
7	0	5000	0	13:50
8	6000	0	0	14:30
9	0	5500	0	15:00
10	0	2000	3000	16:00
11	2000	0	2000	16:30
12	0	0	3000	16:50

Tabla 3.6 Ejemplo de Pedido.

Fuente: Departamento de Planificación.

El algoritmo comienza con la extracción de los datos necesarios para la construcción de la secuencia, la cual será el resultado de una construcción GRASP. Luego calcula el tiempo de conversión de cada orden de trabajo (parte de un pedido) tomando en cuenta los tiempos de preparación y las paradas necesarias (tiempo límite de trabajo). Como paso siguiente el algoritmo crea una lista de candidatos es decir una lista de órdenes de trabajo que estén listas para ser convertidas, la lista es creada por medio de una función de selección del GRASP según un valor alfa. Teniendo la lista creada lo único que falta es escoger aleatoriamente una orden de trabajo para ser añadida a la secuencia de procesamiento de la máquina compatible y disponible en ese momento.

Función Objetivo

Se definió como función objetivo minimizar el tiempo total de espera de cada pedido durante su paso por el área de conversión, ya que como consecuencia de un bajo índice de esperas obtenemos la reducción del costo de manipulación y mantenimiento del inventario.

3.2.1 PSEUDOCODIGO

Inicio

Leer los datos característicos de la maquinaria;

Leer planificación diaria;

Establecer vector secuencia de máquina;

Repita

V. Candidatos = pedidos listos para ser procesados;

V. Makespan máquina = tiempo procesamiento si el candidato es añadido a esa máquina;

Crear lista de mejores candidatos (según criterio);

Seleccionar un candidato aleatoriamente;

Añadir candidato al V. secuencia de máquina;

Hasta completar planificación diaria

Fin

3.2.2 IMPLEMENTACIÓN

La implementación del algoritmo para el área de conversión es posible realizarla al inicio o durante el tiempo en que la máquina corrugadora está realizando los cortes, La planificación realizada software de corrugación tiene muy poco margen de error en cuanto a sus tiempos de procesamiento, con esta poderosa herramienta podemos obtener una

simulación muy buena incluso mucho antes de comenzar la jornada de trabajo.

Para cumplir con el objetivo del presente trabajo se implementará el algoritmo en 5 días laborales pasados con el fin de realizar una comparación real del proceso, en este caso los tiempos en que las ordenes de trabajo abandonan la máquina corrugadora son complemente reales. A continuación, se muestra la planificación para los 5 días de prueba con el detalle correspondiente.

Día 1

Núm. Pedido	Contenido			Hora de Salida
	T1	T2	T3	
1	12000	3000	0	9:30
2	0	2000	4000	9:35
3	0	6000	0	9:50
4	0	6000	0	10:15
5	3000	0	2000	10:30
6	2000	0	5000	10:35
7	0	5000	0	10:55
8	6000	0	0	11:30
9	0	2500	0	11:35
10	0	2000	3000	11:40
11	3000	0	2000	12:20
12	0	0	3000	12:45
13	8000	1000	1000	12:55
14	3000	0	0	13:10
15	1000	3000	3000	13:40
16	0	7000	15000	14:20
17	15000	0	0	14:40
18	2000	0	0	14:50
19	0	1000	10000	15:00
20	1000	0	5000	15:10

Tabla 3.7 Planificación del día 1.

Fuente: Departamento de Planificación.

Día 2

Núm. Pedido	Contenido			Hora de Salida
	T1	T2	T3	
1	8000	0	0	8:40
2	2000	2000	2000	9:00
3	0	0	5000	9:20
4	0	9000	0	9:40
5	10000	20000		10:40
6	3000	3000	3000	10:50
7	0	0	2000	11:12
8	8000	0	1000	11:30
9	1000	2000	0	11:40
10	0	5000	0	11:58
11	5000	0	0	12:20
12	4300	0	0	12:40
13	8000	0	0	12:55
14	0	5500	1000	13:10
15	0	0	5500	13:30
16	2000	2000	2000	13:50
17	0	3000	4000	14:20
18	2000	0	5000	14:30
19	8000	0	0	14:35
20	2000	0	0	14:45
21	0	0	8000	14:55
22	0	8000	0	15:20

Tabla 3.8 Planificación del día 2

Fuente: Departamento de Planificación.

Día 3

Núm. Pedido	Contenido			Hora de Salida
	T1	T2	T3	
1	2000	2000	2000	9:05
2	0	0	4000	9:30
3	0	5000	2000	9:45
4	0	0	5000	10:00
5	8000	0	1000	10:11
6	5000	6000	0	10:20
7	0	0	3500	10:45
8	2000	0	0	11:00
9	1000	8000	0	11:10
10	1000	1000	0	11:30
11	0	10000	2000	11:35
12	0	0	8000	11:40
13	0	0	9000	12:00
14	9000	0	0	12:20
15	0	2000	3000	12:30
16	0	2000	3000	12:50
17	1000	0	0	12:58
18	3000	0	0	13:20
19	2500	0	5000	13:40
20	3500	0	0	14:00
21	0	1000	2000	14:20
22	0	2000	0	14:25
23	0	0	2000	14:30
24	0	0	2000	14:35

Tabla 3.9 Planificación del día 3.

Fuente: Departamento de Planificación.

Día 4

Núm. Pedido	Contenido			Hora de Salida
	T1	T2	T3	
1	2000	0	0	8:50
2	5000	0	2000	9:00
3	0	2000	3000	9:00
4	3000	5000	0	9:10
5	1000	2000	3000	9:30
6	8000	0	0	10:50
7	0	9000	0	10:55
8	1000	0	10000	11:05
9	0	5000	0	12:10
10	2000	0	1000	12:20
11	0	2000	1000	12:40
12	3000	0	1000	12:55
13	0	0	3000	13:04
14	0	2000	0	13:15
15	0	2000	2000	13:25
16	2000	0	0	13:40
17	4000	4000	0	13:58
18	0	2000	2000	14:05
19	1000	0	0	14:25
20	2000	0	3000	14:35
21	3000	3000	3000	14:45
22	2000	0	5000	15:04
23	0	8000	0	15:20
24	5000	1000	0	15:25
25		3000	5000	15:40

Tabla 3.10 Planificación del día 4.

Fuente: Departamento de Planificación.

Día 5

Núm. Pedido	Contenido			Hora de Salida
	T1	T2	T3	
1	0	0	5000	8:40
2	0	2000	2000	9:00
3	6000	1000	0	9:10
4	0	6000	1000	9:25
5	3000	0	0	9:40
6	2000	0	5000	10:00
7	0	5000	0	10:10
8	0	0	4000	10:12
9	1000	5500	0	10:42
10	0	0	3000	10:55
11	2000	2000	2000	11:20
12	1000	0	3000	11:30
13	0	0	5000	11:40
14	4000	0	1000	11:58
15	4000	0	0	12:10
16	0	15000	1000	12:30
17	0	3000	3000	12:35
18	0	0	8000	12:50
19	2200	1000	0	13:20
20	5000	1000	0	13:40
21	0	0	5000	14:00
22	0	0	10000	14:12
23	3000	0	0	14:30
24	0	3000	2000	14:35
25	0	0	1000	14:50

Tabla 3.11 Planificación del día 5.

Fuente: Departamento de Planificación.

Para llevar a cabo una correcta implementación en este caso se necesitó una forma particular de expresar los datos característicos de las máquinas y sobre todo la planificación diaria, para lo cual se creó los formatos correspondientes. (Apéndice D)

3.3 RESULTADOS

En esta sección se mostrará los resultados obtenidos luego de haber implementado el algoritmo constructivo para los 5 días planificados, dichos resultados fueron generados tomando en cuenta lo siguiente:

- El algoritmo tiene como función objetivo minimizar la suma total de los tiempos de espera de cada pedido.
- Se consideró los tiempos de preparación de cada máquina, el tiempo en que la máquina puede estar trabajando sin parar y sobre todo el tipo de caja que es posible procesar en dicha máquina.
- El valor de la espera total es el resultado de una sola implementación con un alfa de aleatoriedad específico igual a 0.85.
- Para facilitar el manejo de los datos en el algoritmo, el tiempo está considerado en minutos, contados desde 00:00 horas.
- Se consideró un escenario perfecto es decir todas las máquinas a su máxima velocidad de producción y sin situaciones adversas.

En la tabla 3.12 se mostrará el resumen de la implementación de la siguiente manera; La columna Secuencia muestra el orden en que se procesará las ordenes en esa máquina durante ese día, las columnas Min. Inicio y Min. Fin muestran el minuto en que inicio y termino de procesar todas la ordenes, por último, la columna Espera Total muestra el resultado de la función objetivo del algoritmo es decir la suma total de esperas generadas durante la jornada de trabajo. (Apéndice E)

Días	Máquinas	Secuencia	Min. Inicio	Min. Fin	Espera Total (Min)
Día 1	Máquina 1	2.t2-5.t1-8.t1-13.t2-15.t1-18.t1-20.t1	575	940	127.3
	Máquina 2	2.t3-6.t3-9.t3-12.t3-15.t3-19.t3	575	976.92	
	Máquina 3	1.t1-6.t1-11.t1-13.t1-17.t1	570	980	
	Máquina 4	3.t2-10.t2-13.t3-16.t2	590	930	
	Máquina 5	5.t3-10.t3-14.t3-16.t3	630	975.38	
	Máquina 6	1.t2-5.t2-7.t2-11.t3-15.t2-19.t2-20.t3	570	966.15	
Día 2	Máquina 1	2.t1-6.t1-8.t1-12.t1-16.t1-18.t1-20.t1	540	963	571.436
	Máquina 2	3.t3-6.t3-14.t3-16.t3-18.t3	560	908.84	
	Máquina 3	1.t1-5.t1-9.t1-11.t1-13.t1-19.t1	520	920	
	Máquina 4	6.t2-9.t2-10.t2-16.t2-17.t2-22.t2	650	1020	
	Máquina 5	2.t3-7.t3-8.t3-15.t3-17.t3	540	906.07	
	Máquina 6	2.t2-4.t2-5.t2-14.t2-21.t3	540	966.92	
Día 3	Máquina 1	5.t1-9.t1-10.t1-15.t1-17.t1-19.t1-20.t1	611	921	576.61
	Máquina 2	2.t3-7.t3-12.t3-15.t3-23.t3	570	885.38	
	Máquina 3	1.t1-3.t1-6.t1-8.t1-14.t1-18.t1-21.t2	545	905	
	Máquina 4	5.t3-9.t2-16.t2-19.t2	611	876	
	Máquina 5	1.t3-4.t3-11.t3-13.t3-24.t3	545	890.28	
	Máquina 6	1.t2-3.t2-6.t2-10.t2-11.t2-16.t3-21.t3-22.t2	545	910.76	
Día 4	Máquina 1	2.t1-5.t1-8.t1-10.t1-12.t1-16.t1-19.t1-21.t1-24.t1	540	1000	325.462
	Máquina 2	2.t3-10.t3-12.t3-15.t3-22.t3	540	943.46	
	Máquina 3	1.t1-4.t1-6.t1-9.t2-15.t2-17.t1-20.t1-22.t1-25.t2	530	1011.67	
	Máquina 4	4.t2-13.t3-18.t2-21.t2-24.t2	550	961	
	Máquina 5	3.t3-5.t3-8.t3-11.t3-18.t3-21.t3-25.t3	540	978.46	
	Máquina 6	3.t2-5.t2-7.t2-11.t2-14.t2-17.t2-20.t3-23.t2	540	981.53	
Día 5	Máquina 1	3.t2-5.t1-6.t1-11.t1-12.t1-15.t1-19.t2-20.t1	550	890	338.667
	Máquina 2	6.t3-11.t3-17.t3-21.t3-25.t3	600	911.15	
	Máquina 3	1.t1-3.t1-9.t1-11.t2-14.t1-17.t2-19.t1-23.t1	520	904.66	
	Máquina 4	2.t2-7.t2-12.t3-16.t3-20.t2-24.t2	540	905	
	Máquina 5	2.t3--4.t3-8.t3-10.t3-13.t3-18.t3-22.t3	540	934.76	
	Máquina 6	4.t2-9.t2-14.t3-16.t2-24.t3	565	900.76	

Tabla 3.12 Resultado de la Implementación.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 ANÁLISIS COMPARATIVO

La tabla siguiente muestra en resumen el comportamiento de las esperas generadas mediante el algoritmo metaheurístico y las esperas obtenidas mediante la metodología de trabajo actual.

Días	Esperas aplicando algoritmo. (min)	Esperas con metodología FIFO. (min)
1	127.3	917.923
2	571.436	1586.26
3	576.61	1821.38
4	325.462	1194.79
5	338.667	1012.26

Tabla 3.13 Comparación de Esperas.

Fuente: Elaboración Propia.

Los tiempos que corresponden a la metodología FIFO fueron generados mediante una simulación creada en el mismo software con las mismas condiciones, ya que no existen datos históricos que ayuden a la comparación y análisis de la efectividad del algoritmo, es evidente que el tiempo generado por esta simulación talvez no sea exactamente igual a la realidad, pero si se puede afirmar que el tiempo real muy difícilmente será menor al generado por la simulación. Se puede notar claramente que para los 5 días de implementación existió una mejora entre el 60% y 70%, este rango de variación está influenciado no solo por la aleatoriedad del algoritmo sino también por la variación que existe entre cada día planificado. (Apéndice G)

3.3.2 REDUCCIÓN DE COSTOS

El costo por unidad almacenada dentro del área de conversión es de 0.094\$ trimestral, se debe tener en cuenta que este costo es obtenido mediante la relación entre el costo total por conceptos de almacenaje durante los tres meses y las unidades (láminas) que en algún momento determinado tuvieron que pasar por la zona de almacenamiento dentro del área de conversión.

El algoritmo metaheurístico está en capacidad de calcular cuántas láminas esperaron y cuantas no, durante la semana de implementación 220.000 de 716.0000 láminas entraron a la zona de almacenamiento lo cual representa un 30.72% de la producción semanal. El costo de almacenamiento generado durante la semana fue de 6.600\$, el cual fue calculado a partir de la información brindada por la empresa respecto al costo base de manipulación, sin embargo, es difícil estimar la reducción durante un gran periodo de tiempo debido a la variabilidad de la demanda. (Apéndice B)

Resultados de la implementación semanal del algoritmo			
Láminas procesadas durante la semana	Láminas que tuvieron que esperar	Costo base de almacenamiento	Costo de almacenamiento generado
878300	220000	0.017	\$ 3,774.00
Costo generado semanal usando la metodología FIFO			\$ 10,837.00

Tabla 3.14 Costos de Almacenamiento semanal.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 POSIBILIDADES DE MEJORA

El Makespan del proceso de conversión sin duda es un punto importante a tratar, actualmente la empresa se ve obligada a pagar horas extras ya que la planificación diaria muchas veces no es cumplida, se puede notar claramente en el diagrama de Gantt generado por el algoritmo metaheurístico que sin esfuerzo podemos cumplir la planificación diaria lo cual es una ventaja para la empresa, esta ventana de tiempo improductivo puede ser aprovechada por el departamento de planificación de tal manera que la producción diaria pueda incrementar notablemente, pero para cumplir este objetivo es necesario un análisis completo de la capacidad de la máquina corrugadora y el comportamiento de la demanda.

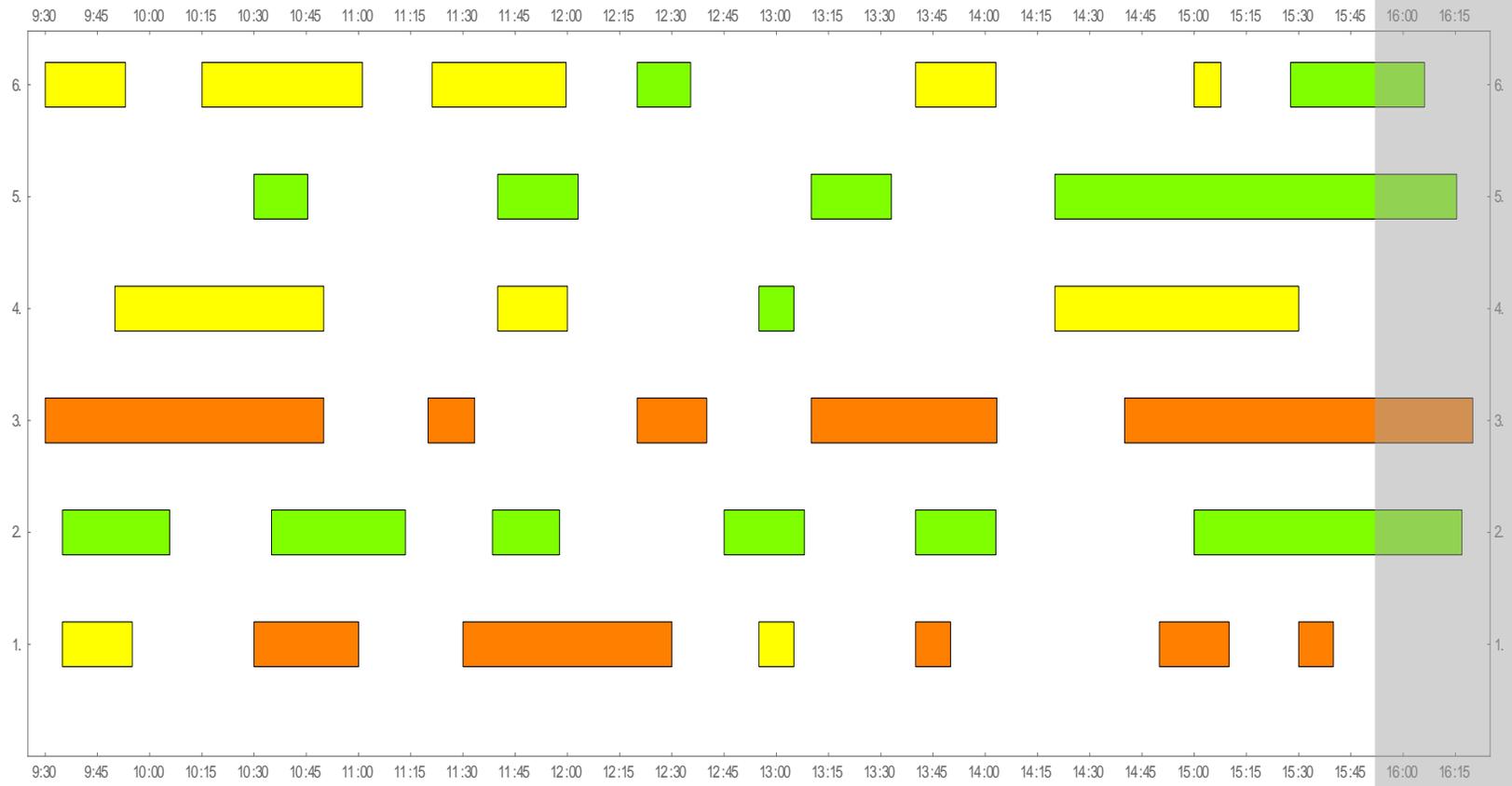


Figura 3.2 Diagrama de Gantt del día 5

Fuente: Elaboración propia

El diagrama de Gantt muestra la secuencia que debe seguir cada máquina, en el eje vertical muestra el número de la máquina y en el eje horizontal muestra las horas del día, se encuentra sombreado el final del día.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIÓN

4.1 RECOMENDACIONES

- Establecer un periodo que sirva para llevar a cabo un plan de implementación del algoritmo metaheurístico con el fin de calibrar el valor alfa (índice de aleatoriedad).
- Una buena manera de obtener una mejora rápida es generar un determinado de iteraciones con diferentes valores de alfa con el fin de obtener un tiempo de espera más corto.
- Adquirir la licencia del software utilizado.
- En caso de que el algoritmo metaheurístico sea tomado en cuenta para la planificación del área de conversión, es recomendable un plan para rediseñar la planificación diaria con el fin de aprovechar al máximo las horas laborales.

4.2 CONCLUSIONES

La secuencia de trabajo de las máquinas convertidoras es un problema que se buscó solucionar mediante la implementación de un algoritmo metaheurístico teniendo en cuenta las limitaciones características de cada máquina, obteniendo así una mejora evidente en dos puntos clave: el tiempo de espera de cada pedido y el tiempo necesario para cumplir con la planificación diaria (Makespan), llegando de esta manera al objetivo planteado al inicio del trabajo. La mejora en estos dos puntos antes mencionados afecta directamente a la utilidad generada por el área de conversión sin mencionar que son muchos más los beneficios de lograr una buena planificación. El constante cambio en el mercado de la industria cartonera en cuanto a la tipología de envases hace necesario buscar soluciones que mantengan a la empresa en un alto nivel competitivo buscando un punto medio entre calidad de producto y la rentabilidad del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Yves Pochet, Mathematical Programming Models and Formulations for Deterministic Production Planning, University Catholique de Louvain, Belgium, 2001.

- [2] J. Kars, Improved performance by integrated corrugator and convertor scheduling, University of Twente, The Netherlands, 2014.

- [3] M. Haouari and R. Hallah, Heuristics algorithms for the two-stage hybrid flow shop problem, Operation Research Letters, 1997.

- [4] L. De Giovanni and F. Pezzella, An improved genetic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem, European Journal of Operational Research , 2010.

- [5] Mircea Ancau, On solving flowshop scheduling problems, Proceedings of the Romanian Academy, 2012

APÉNDICES

APÉNDICE A

ENTREVISTA

Entrevistado: Inspector Encargado del Área de conversión.

Preguntas:

1. ¿Cuántas máquinas convertidoras están operativas actualmente?

Actualmente existen 6 máquinas convertidoras en el área de conversión.

2. ¿Todas las máquinas pueden procesar todos los tipos de láminas?

No, cada máquina tiene su función específica.

3. ¿Existe un área destinada al almacenamiento dentro del departamento de conversión?

Dentro del área de conversión existe una zona de almacenamiento mixta, donde se puede almacenar producto terminado y producto semiterminado.

4. ¿Existe algún tipo de planificación dentro del área de conversión?

Las máquinas convertidoras trabajan acorde a la máquina corrugadora, es decir conforme los pedidos vayan saliendo de la corrugación van entrando a el proceso de conversión.

5. ¿Cuántas láminas puede procesar una máquina convertidora durante toda la jornada laboral?

Durante la planta suele procesar entre 120000 y 160000 láminas.

6. ¿Qué actividades se llevan a cabo durante el tiempo de preparación de la máquina?

Cambio de aditamentos, cambio de tintas, cambio de accesorios de corte y calibración.

APÉNDICE B

TIEMPOS IMPRODUCTIVOS

Corrugadora	
Productivo	7450 min
Improductivo	950 min

Convertidoras	Convertidora No. 1	Convertidora No. 2	Convertidora No. 3	Convertidora No. 4	Convertidora No.5	Convertidora No. 6	TOTALES
Productivos	10200	3020	1500	1580	4000	4500	24800 min
Improductivos	1450	1100	200	540	1010	720	5020 min
TOTALES	11650 min	4120 min	1700 min	2120 min	5010 min	5220 min	29820 min

Trabajo Manual	
productivo	7880 min
Improductivos	1110 min

Fuente: Departamento de Planificación. julio 17- septiembre 17.

APÉNDICE C

COSTOS DE ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO TERMINADO Y EN PROCESO

Departamento	Costo Total	Unidades	Costo Unitario	Costo Base	Costo Mensual
Corrugadora	\$ 20,050.00	750000	\$ 0.0264	\$ 0.008	\$ 6,650.00
Convertidora	\$ 130,050.00	1370000	\$ 0.094	\$ 0.017	\$ 43,350.00
Trabajo manual	\$ 52,220.00	1380000	\$ 0.019	\$ 0.012	\$ 8,740.00

Fuente: Departamento de Planificación. Julio 17- septiembre 17

APÉNDICE D

FORMATO PARA LECTURA DE DATOS

Id Pedido	Tipo Caja	Cantidad	Hora Inicio
1	t1	12000	9:30
1	t2	3000	9:30
2	t2	2000	9:35
2	t3	4000	9:35
3	t2	6000	9:50
4	t2	6000	10:15
5	t1	3000	10:30
5	t3	2000	10:30
6	t1	2000	10:35

Id Máquina	Tipo de Procesamiento	Tiempo de Preparación(min)	Velocidad de Procesamiento(min)	Tiempo Límite de Trabajo(horas)
1	t1, t2	20	100	4
2	t3	25	130	3
3	t1, t2	30	150	4
4	t2, t3	28	100	4
5	t3	23	130	3
6	t2, t3	20	130	3

APÉNDICE E

RESULTADOS GENERADO POR EL SOFTWARE

Día 1

Cortadora.nb * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL

```
Print["La espera total es: ", N[esperaTotal]];
Dataset[Prepend[datosGuardados, {"IdPedido", "IdCaja", "IdMaquina", "Llegada"}
Gantt[datosGuardados]
```

La espera total es: 127.308

IdPedido	IdCaja	IdMaquina	Llegada	Inicio	Fin
1.	t2	6.	570.	570.	593.077
1.	t1	3.	570.	570.	650.
2.	t2	1.	575.	575.	595.
2.	t3	2.	575.	575.	605.769
3.	t2	4.	590.	590.	650.
4.	t2	6.	615.	615.	661.154
5.	t3	5.	630.	630.	645.385
5.	t1	1.	630.	630.	660.
6.	t3	2.	635.	635.	673.462
6.	t1	3.	635.	680.	693.333
7.	t2	6.	655.	681.154	719.615
8.	t1	1.	690.	690.	750.
9.	t3	2.	695.	698.462	717.692
10.	t2	4.	700.	700.	720.
10.	t3	5.	700.	700.	723.077
11.	t3	6.	740.	740.	755.385
11.	t1	3.	740.	740.	760.
12.	t3	2.	765.	765.	788.077
13.	t3	4.	775.	775.	785.

Out[152]=

K < showing 1-20 of 34 > K

Cortadora.nb * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL

```
Print["La espera total es: ", N[esperaTotal]];
Dataset[Prepend[datosGuardados, {"IdPedido", "IdCaja", "IdMaquina", "Lle
Gantt[datosGuardados]
```

La espera total es: 127.308

10.	t2	4.	700.	700.	720.
10.	t3	5.	700.	700.	723.077
11.	t3	6.	740.	740.	755.385
11.	t1	3.	740.	740.	760.
12.	t3	2.	765.	765.	788.077
13.	t3	4.	775.	775.	785.
13.	t2	1.	775.	775.	785.
13.	t1	3.	775.	790.	843.333
14.	t3	5.	790.	790.	813.077
15.	t1	1.	820.	820.	830.
15.	t3	2.	820.	820.	843.077
15.	t2	6.	820.	820.	843.077
16.	t2	4.	860.	860.	930.
16.	t3	5.	860.	860.	975.385
17.	t1	3.	880.	880.	980.
18.	t1	1.	890.	890.	910.
19.	t2	6.	900.	900.	907.692
19.	t3	2.	900.	900.	976.923
20.	t1	1.	910.	930.	940.
20.	t3	6.	910.	927.692	966.154

Out[152]=

K < showing 15-34 of 34 > K

Los pedidos son separados en ordenes de trabajo y son enlistados indicando en que máquina deberá ser procesado.

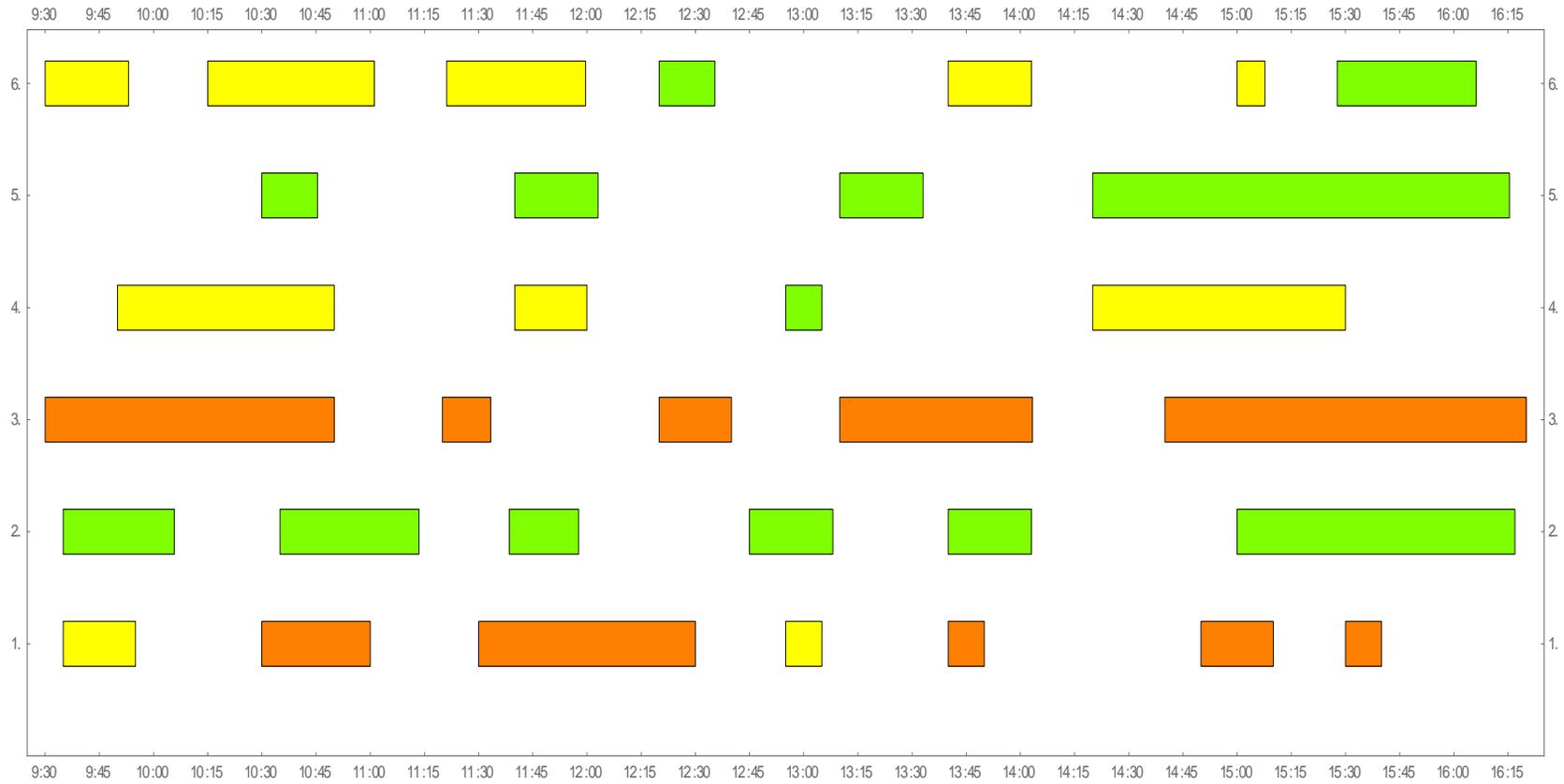


Diagrama de Gantt generado por el software correspondiente el día 1.

Día 2

Cortadora.nb - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
 File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL

```
Print["La espera total es: ", N[esperaTotal]];
Dataset[Prepend[datosGuardados, {"IdPedido", "IdCaja", "IdMaquina", "Llegada", "I"}];
Gantt[datosGuardados]
```

La espera total es: 571.436

IdPedido	IdCaja	IdMaquina	Llegada	Inicio	Fin
1.	t1	3.	520.	520.	573.333
2.	t3	5.	540.	540.	555.385
2.	t2	6.	540.	540.	555.385
2.	t1	1.	540.	540.	560.
3.	t3	2.	560.	560.	598.462
4.	t2	6.	580.	580.	649.231
5.	t1	3.	640.	640.	706.667
5.	t2	6.	640.	669.231	823.077
6.	t2	4.	650.	650.	680.
6.	t3	2.	650.	650.	673.077
6.	t1	1.	650.	650.	680.
7.	t3	5.	672.	672.	687.385
8.	t3	5.	690.	710.385	718.077
8.	t1	1.	690.	700.	780.
9.	t2	4.	700.	708.	728.
9.	t1	3.	700.	736.667	743.333
10.	t2	4.	718.	756.	806.
11.	t1	3.	740.	773.333	806.667
12.	t1	1.	760.	800.	843.

Out[526]

Cortadora.nb - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
 File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL

```
Print["La espera total es: ", N[esperaTotal]];
Dataset[Prepend[datosGuardados, {"IdPedido", "IdCaja", "IdMaquina", "L"}];
Gantt[datosGuardados]
```

La espera total es: 571.436

9.	t2	4.	700.	708.	728.
9.	t1	3.	700.	736.667	743.333
10.	t2	4.	718.	756.	806.
11.	t1	3.	740.	773.333	806.667
12.	t1	1.	760.	800.	843.
13.	t1	3.	775.	836.667	890.
14.	t3	2.	790.	790.	797.692
14.	t2	6.	790.	843.077	885.385
15.	t3	5.	810.	810.	852.308
16.	t3	2.	830.	830.	845.385
16.	t2	4.	830.	834.	854.
16.	t1	1.	830.	863.	883.
17.	t3	5.	860.	875.308	906.077
17.	t2	4.	860.	882.	912.
18.	t3	2.	870.	870.385	908.846
18.	t1	1.	870.	903.	923.
19.	t1	3.	875.	920.	973.333
20.	t1	1.	885.	943.	963.
21.	t3	6.	895.	905.385	966.923
22.	t2	4.	920.	940.	1020.

Out[526]

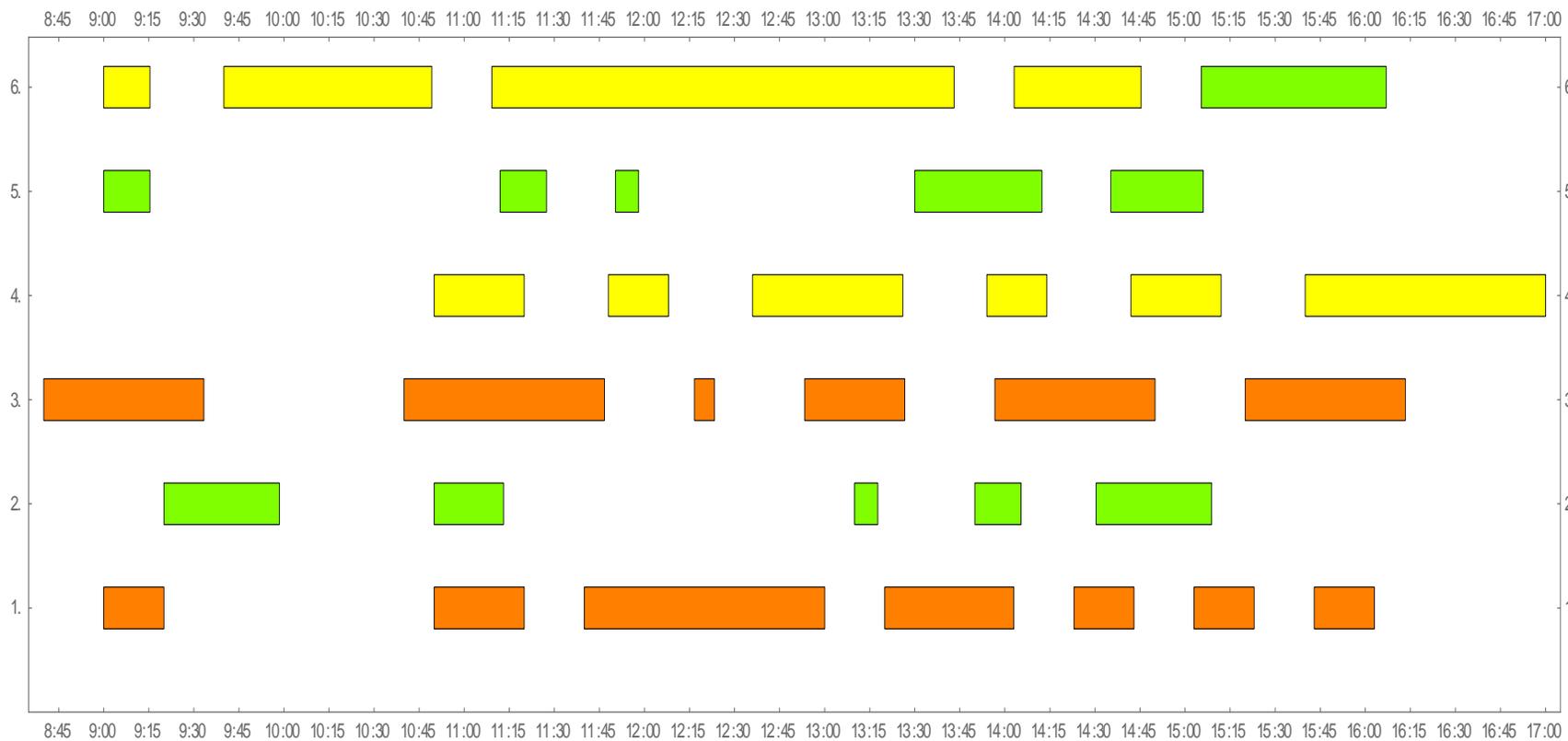


Diagrama de Gantt generado por el software correspondiente el día 2.

Día 3

Cortadora.nb * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
 File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
 WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL

Gantt[datosGuardados]

La espera total es: 576.615

IdPedido	IdCaja	IdMaquina	Llegada	Inicio	Fin
1.	t1	3.	545.	545.	558.333
1.	t3	5.	545.	545.	560.385
1.	t2	6.	545.	545.	560.385
2.	t3	2.	570.	570.	600.769
3.	t2	6.	585.	585.	600.385
3.	t1	3.	585.	588.333	621.667
4.	t3	5.	600.	600.	638.462
5.	t3	4.	611.	611.	621.
5.	t1	1.	611.	611.	691.
6.	t2	6.	620.	620.385	666.538
6.	t1	3.	620.	651.667	685.
7.	t3	2.	645.	645.	671.923
8.	t1	3.	660.	715.	728.333
9.	t1	1.	670.	711.	721.
9.	t2	4.	670.	670.	750.
10.	t2	6.	690.	690.	697.692
10.	t1	1.	690.	741.	751.
11.	t3	5.	675.	675.	690.385
11.	t2	6.	675.	717.692	794.615

Out[745]=

K < showing 1-20 of 37 > X

Cortadora.nb * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
 File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
 WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL

Gantt[datosGuardados]

La espera total es: 576.615

10.	t1	1.	690.	741.	751.
11.	t3	5.	675.	675.	690.385
11.	t2	6.	675.	717.692	794.615
12.	t3	2.	700.	700.	761.538
13.	t3	5.	720.	720.	789.231
14.	t1	3.	740.	758.333	818.333
15.	t2	1.	750.	771.	791.
15.	t3	2.	750.	786.538	809.615
16.	t2	4.	770.	778.	798.
16.	t3	6.	770.	814.615	837.692
17.	t1	1.	778.	811.	821.
18.	t1	3.	800.	848.333	868.333
19.	t1	1.	820.	841.	866.
19.	t2	4.	820.	826.	876.
20.	t1	1.	840.	886.	921.
21.	t3	6.	860.	860.	875.385
21.	t2	3.	860.	898.333	905.
22.	t2	6.	865.	895.385	910.769
23.	t3	2.	870.	870.	885.385
24.	t3	5.	875.	875.	890.385

Out[745]=

K < showing 18-37 of 37 > X

31 + 4

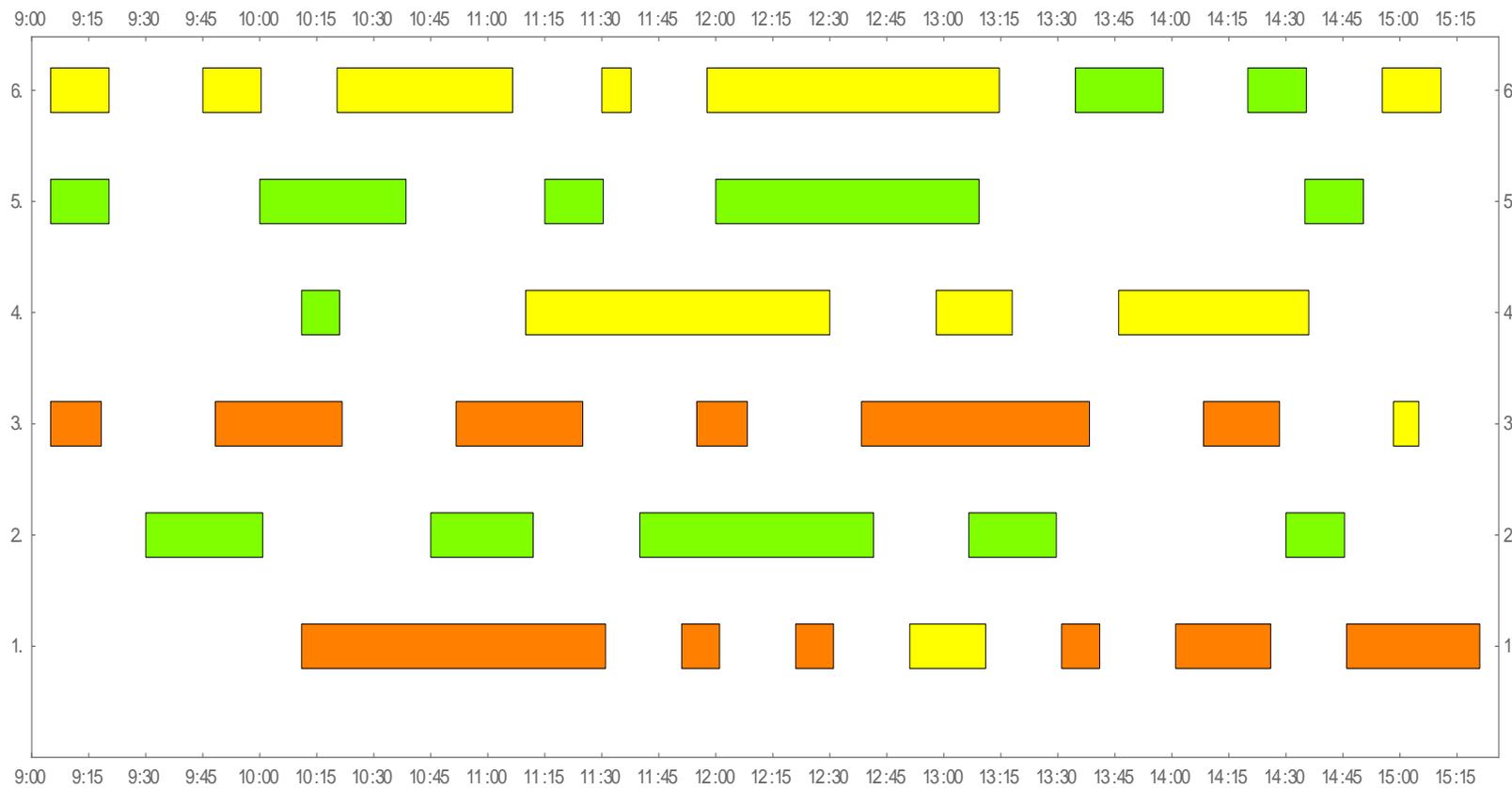


Diagrama de Gantt generado por el software correspondiente el día 3.

Día 4

Cortadora.nb * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
 File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL
 Gantt [datosGuardados]

La espera total es: 325.462

IdPedido	IdCaja	IdMaquina	Llegada	Inicio	Fin
1.	t1	3.	530.	530.	543.333
2.	t3	2.	540.	540.	555.385
2.	t1	1.	540.	540.	590.
3.	t2	6.	540.	540.	555.385
3.	t3	5.	540.	540.	563.077
4.	t1	3.	550.	573.333	593.333
4.	t2	4.	550.	550.	600.
5.	t2	6.	570.	575.385	590.769
5.	t3	5.	570.	586.077	609.154
5.	t1	1.	570.	610.	620.
6.	t1	3.	650.	650.	703.333
7.	t2	6.	655.	655.	724.231
8.	t1	1.	665.	665.	675.
8.	t3	5.	665.	665.	741.923
9.	t2	3.	730.	733.333	766.667
10.	t3	2.	740.	740.	747.692
10.	t1	1.	740.	740.	760.
11.	t3	5.	760.	764.923	772.615
11.	t2	6.	760.	760.	775.385

Out[101]=

K < showing 1-20 of 44 > J

Cortadora.nb * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
 File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help

WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL
 Gantt [datosGuardados]

La espera total es: 325.462

15.	t3	2.	805.	807.692	823.077
15.	t2	3.	805.	805.	818.333
16.	t1	1.	820.	830.	850.
17.	t2	6.	838.	838.	853.385
17.	t1	3.	838.	848.333	875.
18.	t2	4.	845.	845.	865.
18.	t3	5.	845.	845.	860.385
19.	t1	1.	865.	870.	880.
20.	t3	6.	875.	875.	898.077
20.	t1	3.	875.	905.	918.333
21.	t3	5.	885.	885.	908.077
21.	t2	4.	885.	893.	923.
21.	t1	1.	885.	900.	930.
22.	t3	2.	905.	905.	943.462
22.	t1	3.	905.	948.333	961.667
23.	t2	6.	920.	920.	981.538
24.	t2	4.	925.	951.	961.
24.	t1	1.	925.	950.	1000.
25.	t3	5.	940.	940.	978.462
25.	t2	3.	940.	991.667	1011.67

Out[101]=

K < showing 25-44 of 44 > J

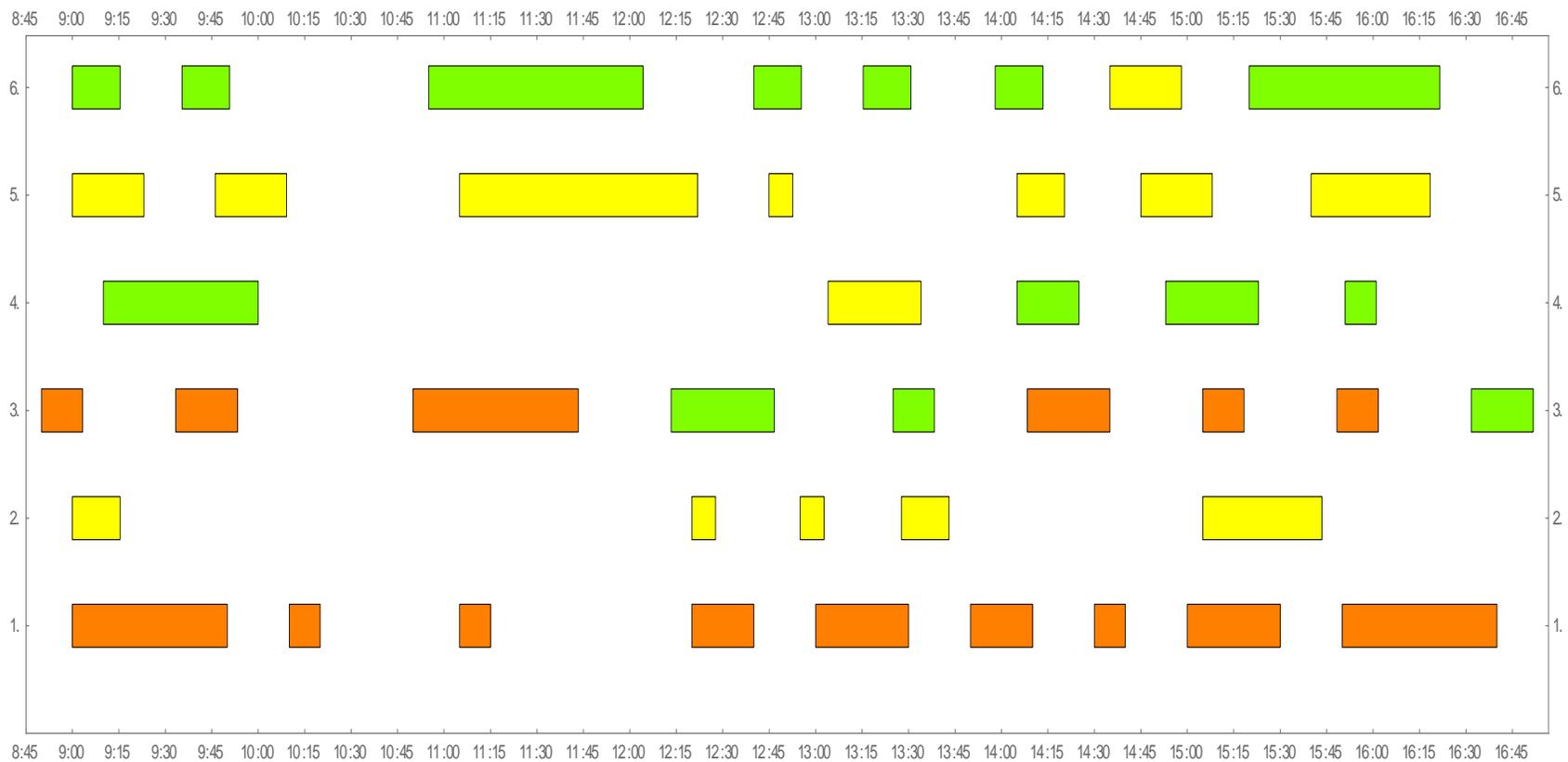


Diagrama de Gantt generado por el software correspondiente el día 4.

Día 5

Cortadora.nb * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
 File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
 WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL

Gantt [datosGuardados]

La espera total es: 338.667

IdPedido	IdCaja	IdMaquina	Llegada	Inicio	Fin
1.	t1	3.	520.	520.	553.333
2.	t3	5.	540.	540.	555.385
2.	t2	4.	540.	540.	560.
3.	t2	1.	550.	550.	560.
3.	t1	3.	550.	583.333	623.333
4.	t3	5.	565.	578.385	586.077
4.	t2	6.	565.	565.	611.154
5.	t1	1.	580.	580.	610.
6.	t3	2.	600.	600.	638.462
6.	t1	1.	600.	630.	650.
7.	t2	4.	610.	610.	660.
8.	t3	5.	612.	612.	642.769
9.	t1	3.	642.	653.333	660.
9.	t2	6.	642.	642.	684.308
10.	t3	5.	655.	665.769	688.846
11.	t1	1.	680.	680.	700.
11.	t3	2.	680.	680.	695.385
11.	t2	3.	680.	690.	703.333
12.	t3	4.	690.	690.	720.

Out[10]=

K < showing 1-20 of 40 > X

Cortadora.nb * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
 File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
 WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL

Gantt [datosGuardados]

La espera total es: 338.667

12.	t1	1.	690.	720.	730.
13.	t3	5.	700.	711.846	750.308
14.	t3	6.	718.	718.	725.692
14.	t1	3.	718.	733.333	760.
15.	t1	1.	730.	750.	790.
16.	t3	4.	750.	750.	760.
16.	t2	6.	750.	750.	865.385
17.	t3	2.	755.	755.	778.077
17.	t2	3.	755.	790.	810.
18.	t3	5.	770.	773.308	834.846
19.	t2	1.	800.	810.	820.
19.	t1	3.	800.	840.	854.667
20.	t2	4.	820.	820.	830.
20.	t1	1.	820.	840.	890.
21.	t3	2.	840.	840.	878.462
22.	t3	5.	852.	857.846	934.769
23.	t1	3.	870.	884.667	904.667
24.	t2	4.	875.	875.	905.
24.	t3	6.	875.	885.385	900.769
25.	t3	2.	890.	903.462	911.154

Out[10]=

K < showing 21-40 of 40 > X

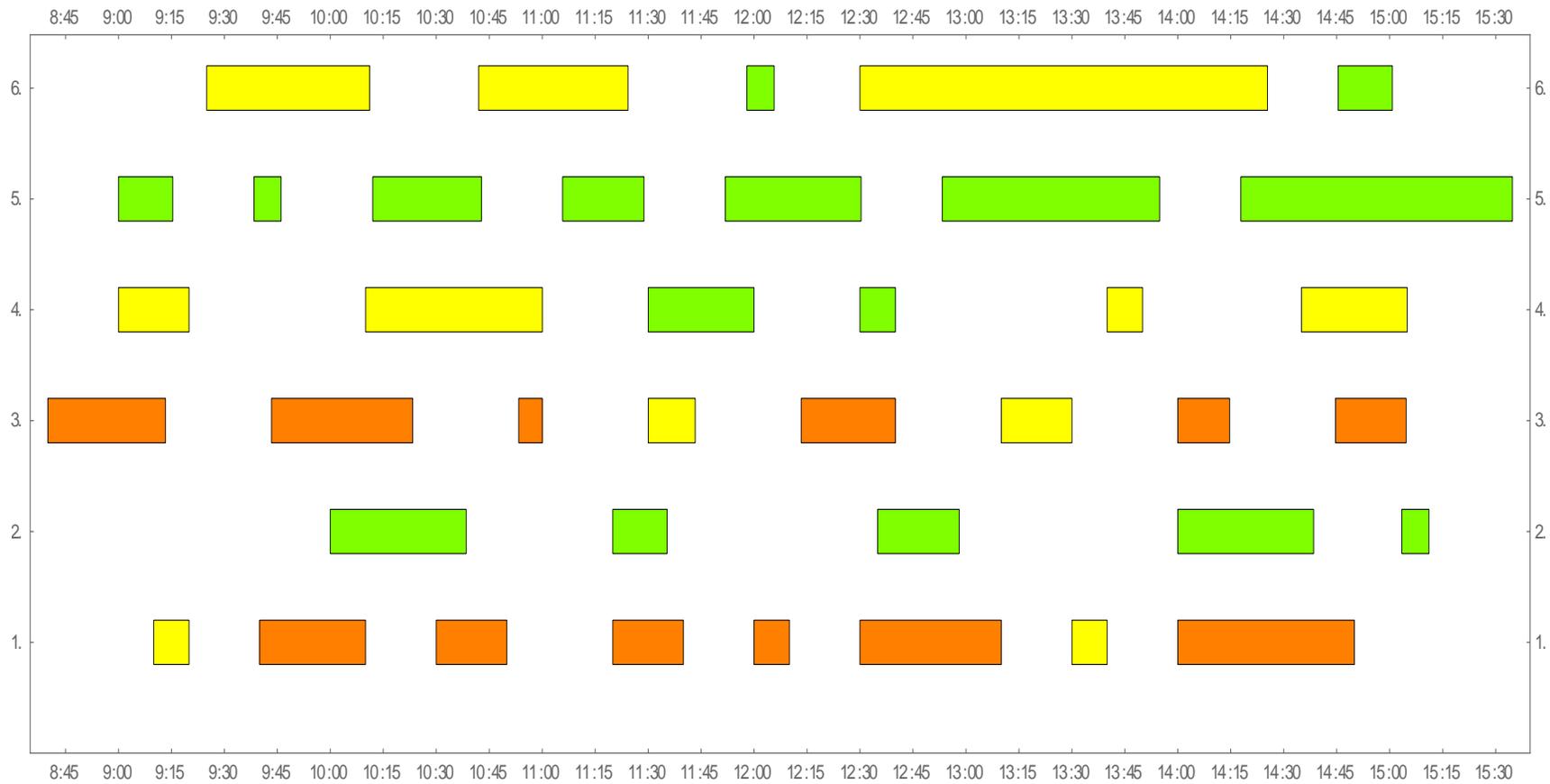


Diagrama de Gantt generado por el software correspondiente el día 5.

APÉNDICE G

SIMULACIÓN DE LA METODOLOGÍA FIFO USANDO MATHEMATICA

```
Untitled-1 * - Wolfram Mathematica 11.0 Student Edition - Personal Use Only
File Edit Insert Format Cell Graphics Evaluation Palettes Window Help
WOLFRAM MATHEMATICA | PRODUCT TRIAL Learning Center | Help | Contact Us | Buy Mathematica

(*Carga de Datos*)
{pedidos, maquinas} = Import["C:\\Users\\jeanl\\Desktop\\Pedidos5.xlsx"][[2 ;;]];
(**)
(*Modificacion de los datos*)
pedidos[[2 ;;, 4]] = (QuantityMagnitude[TimeObject[#] - TimeObject[0]] + 60;
pedidos2 = pedidos[[2 ;;, 4]];
pedidos3 = pedidos[[2 ;;, 3]];
pedidos4 = pedidos[[2 ;;, 2]];
maquinas[[2 ;;, 2]] = StringSplit[maquinas[[2 ;;, 2]], ","];
tiemposPreparacion = Association[Table[maquinas[[i, 1]] -> maquinas[[i, 3]], {i, 2, Length[maquinas]}]];
velocidad = Association[Table[maquinas[[i, 1]] -> maquinas[[i, 4]], {i, 2, Length[maquinas]}]];
tiempolimitetrabajo = Association[Table[maquinas[[i, 1]] -> maquinas[[i, 5]] + 60, {i, 2, Length[maquinas]}]];
vectorMaquina = Association[Table[maquinas[[maq, 1]] -> 0, {maq, 2, Length[maquinas]}]];
tipoCajas = DeleteDuplicates[pedidos[[2 ;;, 2]]];

esperapedidos = 0;
For[i = 1, i < Length[pedidos[[2 ;;, 4]]] + 1, i++,
  elegida = {};
  For[j = 1, j <= Length[velocidad], j++, AppendTo[elegida, {j, vectorMaquina[[j]]}]];
  maquinascandidatas = Position[maquinas[[2 ;;, 2]], pedidos4[[i]][[1 ;;, 1]];
  maquinaelegida = elegida[[maquinascandidatas]][[Position[elegida[[maquinascandidatas]], Min[elegida[[maquinascandidatas]][[2]], 2]][[1]][[1]]][[1]];

  If[pedidos2[[i]] >= Min[vectorMaquina[[maquinascandidatas]]],
    vectorMaquina[[maquinaelegida]] = pedidos2[[i]] + pedidos3[[i]] / velocidad[[maquinaelegida]] + tiemposPreparacion[[maquinaelegida]],
    vectorMaquina[[maquinaelegida]] = vectorMaquina[[maquinaelegida]] + pedidos3[[i]] / velocidad[[maquinaelegida]] + tiemposPreparacion[[maquinaelegida]];
    esperapedidos = esperapedidos + (vectorMaquina[[maquinaelegida]] - pedidos2[[i]])
  ];
  esperapedidos
  vectorMaquina

Out[119]= 1012.26

Out[120]= {1. -> 920., 2. -> 915.385, 3. -> 950., 4. -> 928., 5. -> 932.154, 6. -> 948.923}
```